

Consideraciones sobre la nutrición mineral y orgánica en la producción de la finca

Jaime Arcila Pulgarín - Fernando Farfán Valencia



La nutrición mineral del cafeto

Para la expresión del potencial de un sistema de producción, además del conocimiento de los factores relacionados con los elementos climáticos, los del suelo y el cultivo específico, se requiere de un programa de manejo de la nutrición, adecuado y eficiente, que garantice el suministro de las cantidades de nutrimentos necesarios para mantener una máxima productividad y rentabilidad del cultivo y que además minimice el impacto ambiental.

Con relación al cultivo del café, para el manejo adecuado de la nutrición es necesario un amplio conocimiento de la planta en lo que respecta a las características particulares de su crecimiento, desarrollo y productividad. Como todo organismo vivo, el cafeto tiene un ciclo de vida característico. En el transcurso de este ciclo, es posible distinguir una serie de fases de desarrollo en las cuales la planta permanece por un período de tiempo de corta o larga duración, dependiendo de sus características genéticas y de las condiciones ambientales que se presenten en el sitio de cultivo (Gómez, 1977; Jaramillo y Valencia, 1980; Arcila *et al.*, 1993; Salazar *et al.*, 1994; Arcila y Chaves, 1995; Camayo y Arcila, 1997; Arcila *et al.*, 2001). Durante cada una de estas fases, los requerimientos de asimilados y nutrimentos son variables. Particularmente importante es el conocimiento del desarrollo radical de la planta, aspecto que se trató en detalle en los capítulos iniciales (Arcila, 1992).

Desde el punto de vista climático, los programas de manejo de la nutrición deben considerar la distribución de las lluvias, que influye sobre la disponibilidad temporal del agua y ésta a su vez afecta la disponibilidad de los nutrimentos en el suelo (Jaramillo y Arcila, 1996; Arcila y Jaramillo, 2003). De igual forma en la zona cafetera se presenta una amplia diversidad de suelos y de sus niveles de fertilidad lo que implica una alta variación en la oferta de los elementos necesarios para un óptimo desarrollo del cultivo (Sadeghian, 2003).

Especial atención merece también la nutrición del cultivo cuando se desarrolla en condiciones de monocultivo y a plena exposición solar, caso en el cual las necesidades nutricionales son mucho mayores que cuando se realiza el cultivo en sistemas con sombra (Cardona y Sadeghian, 2005).

El conocer los requerimientos nutricionales de la planta no es condición suficiente para obtener óptimas producciones sino que es necesario además, tener en cuenta los requerimientos según los sistemas de cultivo, las cantidades a aplicar, métodos y épocas de aplicación, fuentes de los nutrimentos a utilizar y además, cómo

afectan las condiciones ambientales la disponibilidad de los elementos, aspectos que se discutirán en el transcurso de este capítulo.

Nutrimentos esenciales y benéficos para la planta

Actualmente se consideran cerca de 21 elementos minerales como esenciales o benéficos para el crecimiento óptimo de las plantas. Una parte de estos elementos los adquiere naturalmente la planta a partir del aire y el agua, otra parte es suministrada por el suelo o artificialmente a través de las prácticas de fertilización (Havlin *et al.*, 1999).

Un nutrimento mineral se considera esencial si cumple tres criterios:

- 1) La planta es incapaz de completar su ciclo de vida si el nutrimento está ausente.
- 2) La función del elemento en la planta no puede ser reemplazada por otro nutrimento.
- 3) El elemento está directamente relacionado con el metabolismo de la planta y no a través de un efecto indirecto como por ejemplo, al actuar como antagonico de un nutrimento presente en cantidades tóxicas.

Los elementos benéficos son aquellos que pueden contrarrestar los efectos tóxicos de otros elementos o suplir el papel de otros nutrimentos en funciones de la planta menos específicas.

Tres elementos, el carbono (C), el hidrógeno (H) y el oxígeno (O) son suministrados por el aire y el agua y son los más abundantes en la planta. Los demás elementos los toma del suelo o son suministrados en fertilizantes o enmiendas.

Los seis macronutrimentos esenciales, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) los requiere la planta en grandes cantidades. El resto de los elementos minerales en cantidades muy pequeñas (trazas). Siete de estos elementos son los denominados micronutrimentos esenciales entre los cuales se incluyen hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu), cloro (Cl) y molibdeno (Mo).

Cinco elementos como sodio (Na), cobalto (Co), vanadio (Va), níquel (Ni) y silicio (Si) se consideran como nutrimentos benéficos solamente para algunas plantas. No se conoce ningún requerimiento específico del café en cuanto a estos elementos.

La distinción entre macronutrimentos y micronutrimentos radica solamente en las cantidades necesarias para

suplir los requerimientos de la planta. La concentración de macronutrientos requerida es de 10 a 10.000 veces más que la de micronutrientos (Havlin *et al.*, 1999).

¿Cómo consiguen las plantas los nutrientes esenciales?

Los elementos como el carbono, hidrógeno y oxígeno no son considerados como nutrientes minerales, pero son fundamentales ya que a partir de ellos se construyen los componentes orgánicos esenciales para la supervivencia de la planta como los azúcares, grasas, ácidos orgánicos, aminoácidos y proteínas, entre otros. Estos elementos se incorporan en la planta a través del proceso fotosintético que ocurre principalmente en las hojas. A través de este proceso, la planta utiliza la energía radiante y el agua (H₂O) para convertir el gas carbónico (CO₂) en carbohidratos. Estos carbohidratos (azúcares) suministran la energía metabólica necesaria para el crecimiento y el desarrollo de la planta (Havlin *et al.*, 1999, Marschner, 1995).

Los demás elementos esenciales (macro y micronutrientos) los obtiene la planta principalmente del suelo o del medio de crecimiento y son incorporados básicamente a través de las raíces y transportados al resto de la misma por medio de pequeños tubos o vasos conductores conocidos como xilema.

Las plantas también pueden adquirir nutrientes a través de las hojas; sin embargo, solamente se pueden suministrar cantidades limitadas de nutrientes a través de aplicaciones foliares. Estas aplicaciones pueden ser efectivas especialmente para corregir o prevenir temporalmente deficiencias de algunos nutrientes (Swietlik y Faust, 1984).

Proceso de absorción de los nutrientes presentes en el suelo

En general se puede decir que la toma de nutrientes por la planta desde el suelo comprende los siguientes aspectos: 1) intercambio de iones en el suelo, 2) difusión de iones en la solución del suelo, hasta las raíces, 3) absorción de iones por la raíz (movimiento a corta distancia), 4) transporte de iones en la planta (movimiento ascendente, movimiento a larga distancia), 5) asimilación y utilización de los iones absorbidos (Havlin *et al.*, 1999).

Intercambio de iones en el suelo.

El intercambio iónico es un proceso reversible por medio del cual un catión o un anión que está adsorbido en la fase sólida del suelo, se intercambia con otros cationes o aniones presentes en la fase líquida. El intercambio de iones en el suelo ocurre sobre las superficies de las arcillas minerales, compuestos inorgánicos, materia orgánica y raíces. El ion específico asociado a estas superficies depende de la clase de minerales presentes y de la composición de la solución del suelo. Si dos fases sólidas entran en contacto, también pueden intercambiar iones entre sus superficies. Para la nutrición de la planta generalmente se considera como más importante el proceso de intercambio de cationes (CIC), ya que la capacidad de intercambio de aniones (CIA) de la mayoría de los suelos agrícolas es muy pequeña en comparación con la capacidad de intercambio de cationes (Brady y Weil, 2000, Havlin *et al.*, 1999).

Movimiento de iones del suelo hasta las raíces

Para que los iones puedan ser absorbidos por las raíces deben ponerse en contacto con la superficie de ésta. Hay tres mecanismos por medio de los cuales los iones se hacen disponibles a las raíces: 1) interceptación por la raíz, 2) difusión de iones en la solución del suelo y 3) movimiento de los iones en masa con la solución del suelo (Havlin *et al.*, 1999).

Interceptación radical: Su importancia como mecanismo de absorción de iones es mayor a medida que nuevas raíces crecen a través de la masa del suelo y ocurren las infecciones micorrízicas. A medida que el sistema radical se desarrolla y explora el suelo, la solución del suelo y las superficies que retienen los iones adsorbidos se exponen a la masa radical y se lleva a cabo la absorción de estos iones por un mecanismo de intercambio por contacto. Algunas plantas pueden explorar mejor el suelo para obtener nutrientes y agua, porque poseen sistemas radicales más grandes y finamente ramificados. La interceptación de nutrientes también puede ser mejorada por micorrizas cuyas hifas actúan como extensiones del sistema radical ampliando así las superficies de contacto.

Flujo masal: Ocurre cuando los nutrientes y otras sustancias disueltas se transportan en el flujo de agua hacia la raíz, como resultado del consumo transpiratorio. Algún flujo masal también ocurre en respuesta a la evaporación y percolación del agua del suelo. Las cantidades de nutrientes que alcanzan las raíces por flujo masal son determinadas por la tasa de flujo de agua o por el consumo de agua por la planta y el contenido

de nutrimentos en la solución del suelo. A medida que se disminuye la humedad del suelo, disminuye el flujo de agua y nutrimentos hacia las raíces. Si disminuye la transpiración merma el movimiento de nutrimentos por flujo masal.

Difusión: Ocurre cuando un ion se mueve de un punto de alta concentración a uno de baja concentración. A medida que la planta absorbe nutrimentos de la solución que rodea las raíces, se inicia un gradiente que causa la difusión de iones hacia la raíz. Las raíces al absorber los nutrimentos de esta manera, crean un vertedero al cual se difunden estos. Un alto requerimiento de la planta o un alto poder de absorción de la raíz resultan en un vertedero muy fuerte o en un gradiente de difusión muy alto, favoreciendo así el transporte. La mayoría del fósforo y del potasio se mueven a la raíz por difusión. Tres factores principales favorecen la difusión de los iones a la raíz: El coeficiente de difusión, la concentración del ion en la solución y la capacidad amortiguadora de la fase sólida del suelo, para el respectivo ion, en la solución del suelo. De estos factores el más importante es el coeficiente de difusión pues controla qué tan lejos se pueden difundir los iones a la raíz. Para un espaciamiento determinado de las raíces en el suelo, el coeficiente de difusión determina la fracción de los nutrimentos en el suelo que pueden alcanzar la raíz durante un período específico del crecimiento de la planta. La difusión es altamente sensible a la temperatura y a la humedad del suelo. La planta experimentará dificultades para obtener agua y iones minerales si hay una limitación en la cantidad de raíces, por bajas temperaturas del suelo y por deficiencia hídrica.

Absorción de iones por la raíz (movimiento a corta distancia)

Desde el punto de vista de la nutrición de la planta, la estructura de la célula vegetal es de gran importancia ya que en su organización se presentan dos rasgos característicos que afectan la adquisición y absorción de nutrimentos: la pared celular y las membranas (Marschner, 1995).

La pared celular le proporciona a la célula resistencia mecánica y es permeable a la mayor parte de los compuestos, desde proteínas muy grandes hasta agua y iones inorgánicos. El transporte de iones a través de la pared celular se lleva a cabo principalmente por difusión y se suele denominar como transporte pasivo.

Por su parte, la membrana plasmática o plasmalema es una barrera de permeabilidad entre la célula vegetal y su medio ambiente; además, al interior de la célula se encuentran otras membranas que dividen la célula en una serie de compartimentos de características

particulares cada uno, como el citoplasma, la vacuola, el cloroplasto, la mitocondria, los peroxisomas, entre otros. Toda membrana está compuesta en su mayor parte por proteínas y lípidos. Las membranas biológicas son totalmente permeables a moléculas pequeñas no cargadas como agua y oxígeno, ya que estas moléculas poseen una alta solubilidad en lípidos y pueden pasar a través de la capa lipídica que poseen las membranas. Por el contrario, moléculas más grandes sin carga como la sacarosa, o moléculas cargadas como los iones inorgánicos, o ácidos orgánicos, no pueden atravesar la capa lipídica y su paso a través de ella se efectúa por medio de canales o transportadores de los que cada membrana posee un juego característico; este tipo de transporte se denomina como transporte activo. Debido a que las concentraciones de iones son mayores al interior que por fuera de la célula, el transporte de iones a través del plasmalema es estrictamente contra un gradiente electroquímico y por consiguiente, requiere de energía derivada del metabolismo celular. La naturaleza del compuesto transportador no se conoce pero es muy probable que esté directamente conectado con proteínas o que el mismo sea una proteína. El transporte activo de iones es también un proceso selectivo, de forma que iones específicos, son transportados a través del plasmalema por transportadores específicos (Marschner, 1995; Taiz y Zieger, 2002).

Los iones penetran a las células de los tejidos radicales y luego se movilizan hasta los vasos conductores del xilema para ser transportados al resto de la planta. Cuando una célula epidérmica de la raíz absorbe un ión, antes de llegar al xilema, éste debe atravesar primero la epidermis, varias células corticales, la endodermis y por último el periciclo. Se han considerado dos rutas para la absorción de solutos a través de la raíz: una es la ruta simplástica (por dentro de la célula, también denominada espacio interno o simplasto) en la cual, los solutos entran en una célula de la epidermis y se mueven de célula a célula hasta el xilema, a través de unos orificios llamados plasmodesmos (canales de membrana llenos de agua que atraviesan las paredes celulares). La otra ruta es la apoplástica (por fuera de las células, también denominado espacio externo, espacio libre aparente o apoplasto), en la cual los solutos se difunden a través de las paredes y espacios intercelulares de las células adyacentes sin ser captados por ninguna célula hasta llegar a la endodermis, en donde se interrumpe su transporte por la presencia de la banda de Caspari que consiste en depósitos de suberina entre las células endodérmicas y que es impermeable incluso para los solutos y los iones pequeños. Para superar esta barrera y llegar al xilema, los solutos deben penetrar a una célula y luego continúan su movimiento de célula a célula por los plasmodesmos (Marschner, 1995; Taiz y Zieger, 2002).

Transporte de iones dentro de la planta (movimiento ascendente, movimiento a larga distancia)

Cualquiera que sea la ruta desde el suelo, a través de la raíz, hasta el xilema, los iones que se transportan hacia la parte aérea deben entrar hasta las células muertas de conducción del xilema: los vasos y las traqueidas. Esto implica una transferencia desde las células vivas del periciclo o del xilema. La liberación de los iones al xilema ocurre a través de mecanismos activos.

El transporte a larga distancia por el xilema tiene lugar principalmente en vasos no vivos. Este transporte es impulsado por el gradiente de presión hidrostática (presión radical) y por el gradiente de potencial de agua creado por la corriente transpiratoria, el cual es muy pronunciado durante el día cuando los estomas están abiertos, y sigue este patrón: atmósfera > hojas > xilema > raíz > solución del suelo. Un incremento en la tasa de transpiración aumenta la toma y la translocación de minerales en el xilema. El flujo de solutos de la raíz al ápice es unidireccional. Aunque el mecanismo predominante en el xilema es de flujo masal en los vasos muertos (apoplasma), ocurren interacciones entre los solutos y las paredes de los vasos y las células del parénquima que lo rodean. Las mayores interacciones son adsorción por intercambio de cationes polivalentes y reabsorción de elementos minerales y la secreción de compuestos orgánicos por las células vivas contiguas del parénquima del xilema y floema (Marschner, 1995; Taiz y Zieger, 2002).

El efecto de la transpiración sobre las tasas de absorción y translocación de nutrientes depende predominantemente de los siguientes factores: edad de la planta (ejemplo: cantidad de follaje), hora del día (mayor en el día), concentración externa (a mayor concentración mayor tasa de absorción), concentración interna (a mayor concentración mayor tasa de translocación), tipo de elemento (existe un rango típico, moléculas no cargadas son transportadas más rápido). El transporte a larga distancia de un elemento mineral en el xilema debe resultar en una distribución característica de este elemento en los diferentes órganos de la planta (Marschner, 1995; Taiz y Zieger, 2002).

Absorción foliar de nutrientes. Los estomas son los sitios de intercambio de gases (CO_2 , O_2) con la atmósfera. Elementos minerales en la forma de gases como SO_2 , NH_3 , NO_3 también entran a las hojas por los estomas. En plantas acuáticas las hojas son los sitios de absorción de minerales. En las plantas terrestres, la toma de solutos por la superficie foliar y otras partes es severamente restringida por la pared externa de las células de la epidermis. Esta pared está cubierta por una capa de cera y cutina (semihidrofóbica) y contiene además pectina,

hemicelulosa y celulosa (Swietlik, 1984; Marschner, 1995; Taiz y Zieger, 2002).

La cutícula funciona como un intercambiador de cationes muy débil atribuible a la carga negativa de los materiales pécticos y los polímeros no esterificados. Existe un gradiente característico de baja a alta densidad de carga desde la superficie externa de la hoja hacia la pared celular; la penetración de iones es favorecida a través de este gradiente. El movimiento de solutos a través de la capa cuticular se lleva a cabo en cavidades o canales llamados ectodesmas (Freire *et al.*, 1981).

Así como las raíces, las hojas absorben los nutrientes desde el apoplasma y esta absorción es afectada similarmente por factores externos como la concentración y carga del ion del nutriente, la temperatura, y factores internos como la actividad metabólica. La tasa de absorción disminuye generalmente con la edad de la hoja (Marschner, 1995).

La aplicación foliar de nutrientes por aspersion ofrece una manera de suministrar nutrientes en forma más rápida que la aplicación edáfica. Este suministro es sin embargo temporal y puede tener varios problemas: bajas tasas de penetración, especialmente en hojas con cutículas gruesas, escorrentía de las superficies hidrofóbicas, lavado por lluvia, secado rápido de la solución, tasa limitada de retranslocación de ciertos nutrientes como el calcio, sólo se puede aplicar una cantidad limitada de macronutrientes, y daño a las hojas (Swietlik, 1984, Freire *et al.*, 1981).

La aspersion foliar puede ser de utilidad práctica en los siguientes casos: baja disponibilidad de nutrientes en el suelo (Fe en suelos calcáreos, Mn en suelos con pH alto y MO alta, Mo en suelos minerales ácidos); capa superficial del suelo muy seca; disminución de la actividad de raíces durante el estado reproductivo; aumento del contenido de proteínas en cereales; aumento del contenido de calcio en frutos para prolongar su vida de almacenamiento (Havlin *et al.*, 1999).

Utilización de iones por la planta

Los nutrientes esenciales adquiridos por la planta son incorporados a su metabolismo para desempeñar diversas funciones las cuales se pueden resumir en dos categorías (Marschner, 1995; Taiz y Zieger, 2002).

Nutrientes constituyentes de la planta. Son aquellos que al ser asimilados se hacen parte integral de compuestos químicos esenciales para el metabolismo o que son utilizados en la construcción de la estructura de la planta como los azúcares, proteínas, celulosa, paredes celulares, lípidos, membranas, entre otros. En este grupo se incluyen los siguientes macronutrientes:

carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S).

Nutrientes con funciones bioquímicas de regulación.

Son aquellos elementos que actúan como iones o pequeñas moléculas para ser donantes de energía, receptores, agentes tampón, agentes osmóticos, cofactores o mensajeros y su función afecta los procesos bioquímicos o fisiológicos de la planta. En este grupo se incluyen los macronutrientes fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y los micronutrientes hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu), y molibdeno (Mo).

La capacidad de la planta para asimilar y utilizar los nutrientes minerales para su crecimiento y desarrollo, se denomina “nutrición”. El estado de nutrición de las plantas depende de numerosos factores relacionados con el suelo, el clima y el tipo de planta (especies y variedades) y puede clasificarse así (Havlin *et al.*, 1999, Taiz y Zieger, 2002):

- **Deficiente:** Cuando la concentración de un elemento esencial es tan baja que limita en forma severa la producción y causa síntomas de deficiencia más o menos característicos. En caso extremo de su deficiencia, la planta muere. Si hay una deficiencia ligera, aunque no se presenten síntomas visibles, la producción se reducirá.
- **Rango crítico:** Concentración del nutriente por debajo de la cual ocurre una respuesta en producción al aplicar el nutriente. Los niveles o rangos críticos varían según la planta y el nutriente pero se ubica en algún punto entre los niveles de deficiencia y suficiencia.
- **Suficiente:** Cuando el nivel del elemento esencial en la planta es adecuado para una producción óptima y no se obtiene respuesta en producción al aplicarlo, aunque se aumente su nivel en la planta.
- **Excesivo o Tóxico:** Cuando la concentración de un elemento esencial o de otro es lo suficientemente alta para reducir severamente el crecimiento y la producción. Una toxicidad severa dará como resultado la muerte de la planta. Cuando el nivel de un elemento esencial es excesivo puede causar desbalance en otros elementos y reducir la producción.

Manejo de la nutrición edáfica en la producción de café en Colombia

Un programa de nutrición eficiente debe permitir suministrar a la planta los nutrientes minerales

suficientes para mantener producciones altas y rentables y con un mínimo efecto en el deterioro ambiental. Una nutrición inadecuada de la planta que limite la producción, puede traer consecuencias económicas y ambientales severas. Para asegurar una óptima disponibilidad de nutrientes a través de prácticas efectivas de manejo de los nutrientes se requiere conocer muy bien las interacciones entre el suelo, la planta y el ambiente.

Características del suelo

Básicamente, el suelo es un medio de enraizamiento y un sitio de almacenamiento de agua y nutrientes. Por esta razón es esencial facilitarle a la planta que desarrolle sus raíces tanto lateralmente como en profundidad para que exploren suficientemente el suelo y extraigan de éste el máximo de nutrientes y también es necesario además que el suministro de agua sea el adecuado (Suárez de Castro, 1953; Arcila, 1992; Jaramillo y Arcila, 1996; Suárez, 2000).

Una apropiada fertilización asegura no solamente un buen desarrollo de la parte aérea sino también un mayor desarrollo y vigor del sistema radical. Las aplicaciones de nitrógeno y fósforo son especialmente útiles para este fin. Otros elementos se aplicarán de acuerdo con las necesidades del cultivo (Havlin *et al.*, 1999).

Debido a que el café se cultiva en diferentes tipos de suelos, no es posible manejar su nutrición a través de una recomendación generalizada, por lo cual es necesario asesorarse de un técnico y recurrir a los análisis de suelos. Los análisis de suelos son una herramienta muy importante para determinar los niveles de los nutrientes en cada suelo y las cantidades y fuentes de fertilizante o enmiendas que deben aplicarse (Valencia *et al.*, 1990; Valencia, 1992; González *et al.*, 2003; Sadeghian, 2003).

Características de la planta

La cantidad de nutrientes que requiere el cultivo varía con la edad y su estado de desarrollo. Desde el punto de vista de manejo de la nutrición, en el caso del café, se pueden considerar las siguientes etapas de desarrollo de la planta:

Germinación: En esta etapa no se requiere la adición de nutrientes ya que la semilla contiene todas las sustancias necesarias para su desarrollo y solamente necesita condiciones adecuadas de humedad, oscuridad y temperatura.

Almácigo: El empleo de pulpa descompuesta en las bolsas del almácigo permite obtener plantas vigorosas y sanas (Valencia y Salazar, 1993). No es recomendable el uso de fertilizantes granulados o foliares durante esta

etapa, ya que estos no sustituyen los efectos benéficos de la pulpa y se corre el riesgo de intoxicar las plantas (Salazar,1977; Guzmán y Riaño, 1996).

Crecimiento vegetativo (levante): Comprende desde la siembra definitiva en el campo o desde el zoqueo, hasta el momento en que por lo menos el 50% de las plantas hayan florecido, aproximadamente 11 meses. Durante este período, la planta está formando principalmente raíces, ramas y hojas. En esta etapa hay una demanda alta de nitrógeno y fósforo principalmente, aunque otros nutrientes pueden ser también necesarios, dependiendo del sitio de cultivo. Las cantidades y fuentes de fertilizante a aplicar dependen de cada tipo de suelo y la mejor forma de determinarlas es mediante el análisis de suelos. Es importante considerar además la dosificación correcta de las cantidades de fertilizante de acuerdo con la edad de la planta para evitar intoxicaciones (Uribe y Salazar, 1984; Valencia, 1990 y 1992; Valencia y Arcila, 1975).

Producción: A partir de los 11 meses, la planta entra en la fase reproductiva y la primera cosecha que generalmente es poca, se recoge hacia los 18-20 meses. En general, se obtienen dos cosechas al año: una en el primer semestre y otra en el segundo semestre. La cantidad de cosecha de cada semestre varía de acuerdo con las regiones (latitud y altitud) (Arcila *et al.*, 2001). Simultáneamente con el desarrollo de la cosecha la planta también debe producir nuevo crecimiento de ramas y hojas para las cosechas futuras, razón por la cual los requerimientos nutritivos son mayores durante esta fase (Riaño *et al.*, 2004).

Además del nitrógeno (N) y el fósforo (P) se necesita potasio (K), calcio (Ca), magnesio(Mg), azufre (S) y los microelementos como el boro, zinc, manganeso, cobre, hierro, molibdeno. Las cantidades y fuentes de fertilizante que deben aplicarse dependerán de cada tipo de suelo y la mejor forma de determinarlas es mediante el análisis de suelos (Valencia *et al.*, 1975; Uribe y Mestre, 1976; Valencia y Arcila, 1977; Uribe y Salazar, 1981; Valencia, 1989; Valencia y Carrillo, 1990; Valencia,1991).

La época y la frecuencia recomendada para aplicar los fertilizantes es dos meses antes del comienzo de la cosecha en cada semestre, por ejemplo febrero y julio, es decir dos aplicaciones por año (Mestre y Uribe, 1980). La aplicación del fertilizante en estas épocas no sólo favorece el crecimiento y desarrollo de los frutos sino también la formación de nudos y hojas para las próximas cosechas. En la Figura 9.1 se resumen las épocas de fertilización y enmiendas de acuerdo al ciclo del cultivo.

En general, no es necesaria la aplicación rutinaria de micronutrientes (Uribe y Salazar, 1981,Valencia *et al.*, 1968). Estas deben hacerse solamente en casos muy específicos (Valencia, 1964, 1973, Valencia y Arcila,1975).

Renovación: Después de que la planta ha producido 4-5 cosechas, se renueva mediante el zoqueo y la planta comienza un nuevo ciclo de crecimiento vegetativo (levante) y de producción, y la nutrición se manejará en la misma forma que para el ciclo de siembra. Durante el primer año es común observar en las zocas

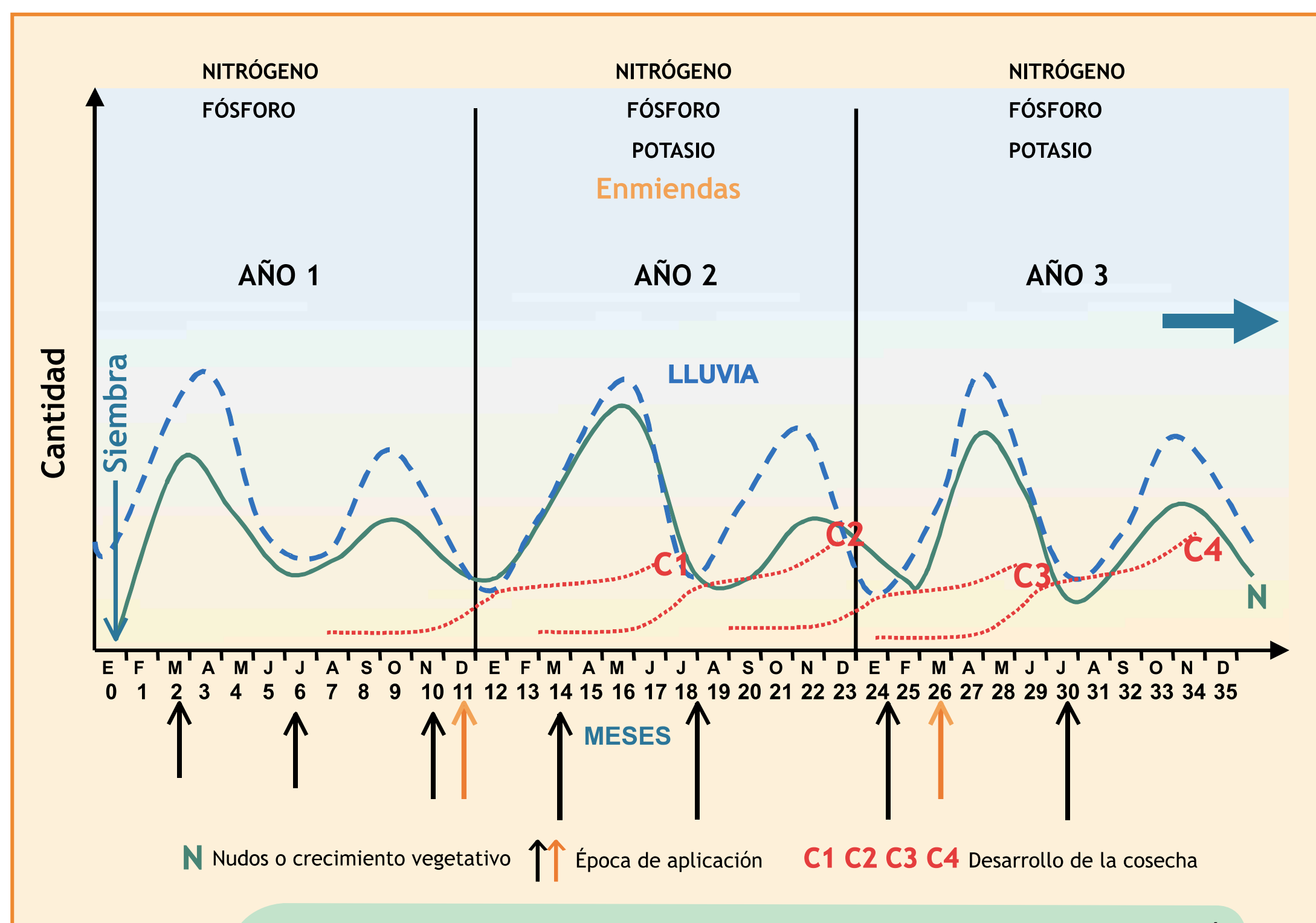


Figura 9.1. Requerimientos nutritivos y enmiendas para el cultivo del café de acuerdo al ciclo de vida.

amarillamientos, clorosis o deformaciones de las hojas asociadas a deficiencias de micronutrientes como hierro o zinc, pero estos síntomas son temporales y van desapareciendo gradualmente, sin necesidad de aplicaciones especiales de fertilizante, excepto cuando se trata de problemas de mal desarrollo radical o tallos enfermos o intoxicaciones con glifosato.

Factores ambientales

La disponibilidad de agua en el suelo es fundamental para que la planta pueda nutrirse bien ya que esta es el vehículo a través del cual los nutrientes se disuelven en el suelo y se mueven en la planta. Se deben aplicar los fertilizantes cuando el suelo se encuentre bien húmedo ya que bajo esta condición, las raíces pueden interceptar mayor cantidad de nutrientes (Jaramillo y Arcila, 1996).

Absorción foliar de nutrientes por el cafeto

La planta presenta una estructura morfológica diseñada y adaptada para llevar a cabo funciones específicas que al integrarse dan como resultado el crecimiento y desarrollo de la planta y la cosecha. Así, por ejemplo, las raíces tienen como principal función proporcionar anclaje y además explorar el suelo para interceptar los nutrientes minerales necesarios para el óptimo crecimiento y desarrollo. Los tallos y ramas sirven como medio para el transporte del agua y los nutrientes hasta las hojas y otras partes de la planta. Las hojas son estructuras especializadas en intercambio gaseoso a través de los estomas y en captura de la energía solar incidente sobre la lámina, funciones fundamentales para los procesos de fotosíntesis y transpiración. Mediante el proceso de fotosíntesis se aprovecha la energía solar y se absorbe el CO₂ ambiental para elaborar los componentes orgánicos de la planta y la cosecha. Mediante el proceso de transpiración la planta controla la pérdida de agua. De lo anterior se deduce que la función principal y fundamental de las hojas está relacionada con la síntesis de los principales componentes orgánicos de la planta; sin embargo, se ha demostrado que las hojas también pueden absorber algunas sustancias químicas que entren en contacto con su superficie (Marschner, 1995; Havlin *et al.*, 1999; Kannan, 1990).

También se ha comprobado que prácticamente todos los nutrientes minerales pueden ser absorbidos a través de la hoja, pero las cantidades que se pueden suministrar por este medio son limitadas. En el caso de plantas de tipo arbóreo y de ciclo de crecimiento largo como el cafeto, esto significa que no es posible suplir

los requerimientos de nutrición mineral solamente con aplicaciones al follaje (Swietlik y Faust, 1984).

En la práctica, ciertos fertilizantes que son solubles en agua se han aplicado directamente al follaje en una variedad de cultivos. Para que la planta aproveche los nutrientes, éstos deben penetrar la cutícula o los estomas de la hoja y luego entrar hasta las células para ser incorporados al metabolismo de la planta. Aunque éste método de suministro permite una rápida utilización de los nutrientes y la corrección de deficiencias en menos tiempo que con las aplicaciones al suelo, la respuesta es sólo temporal y serían necesarias muchas aplicaciones (Freire *et al.*, 1981; Havlin *et al.*, 1999).

En la actualidad el principal uso que se le ha dado a la fertilización foliar ha sido en el campo de los micronutrientes ya que estos elementos los requiere la planta en cantidades muy bajas. Una gran limitación para suministrar foliarmente las cantidades adecuadas de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, es el riesgo de quemar las hojas, los grandes volúmenes de solución que se deben manejar, el alto número de aplicaciones y el uso de la mano de obra (Havlin *et al.*, 1999).

En general, se utilizan en las aspersiones foliares en concentraciones de menos del 2% con el fin de evitar daños al follaje. Las hojas jóvenes son especialmente susceptibles de quemarse (Taiz y Zieger, 2002).

Los micronutrientes se prestan más para aplicaciones foliares porque la planta los requiere en cantidades muy bajas y son más eficientemente absorbidos en comparación con el suministro al suelo.

Numerosos factores afectan la efectividad de las aplicaciones foliares de nutrientes y están relacionados con la planta (características de la hoja, estado nutricional y desarrollo del cultivo, tolerancia del follaje), el ambiente (temperatura, luminosidad, estado hídrico, hora del día) y tecnología de aplicación (tipo de producto, características de la solución, tipo de equipo) (Freire *et al.*, 1981; Swietlik y Faust, 1984; Marschner, 1995).

Las plantas pueden absorber los elementos minerales esenciales mediante aplicaciones foliares pero solamente en cantidades limitadas. Para el suministro de los elementos mayores, la fertilización foliar se debe considerar como un complemento y no como sustituto de la fertilización edáfica. En el caso de los microelementos la fertilización foliar puede ser sustitutiva.

En café se ha comprobado la absorción foliar de: nitrógeno (urea 1%, Sulfato de amonio 3%); fósforo (Fosfato monoamónico 3%); magnesio (Sulfato de magnesio 3%); boro (Borax 0,3%); hierro (Sulfato de hierro 3%, sin

translocación); zinc (Sulfato de zinc 0,5 - 1%); cobre (Sulfato de cobre 0,3-0,5%) (Valencia,1992).

También se ha estudiado el efecto de la fertilización foliar en diferentes etapas de desarrollo del cultivo.

Etapa de almácigo

En los estudios realizados en Colombia en la etapa de almácigo, se comparó el efecto de la pulpa y de 4 y 9 fertilizantes foliares respectivamente y no se encontró efecto benéfico de las aplicaciones foliares tanto en suelos con pulpa como sin pulpa (Valencia, 1975; Guzmán y Riaño, 1996).

Cafetos en producción

En investigaciones realizadas en Colombia encontraron que al comparar 6 y 12 aplicaciones de fertilizante foliar (N-P-K), como reemplazo de aplicaciones al suelo (N-P-K), durante varios años, las producciones siempre fueron inferiores cuando el fertilizante se aplicó foliarmente (López, 1970; Valencia, 1980). Resultados similares fueron registrados en investigaciones en Brasil por Santinato (1989).

En general, en el mundo cafetero, se han empleado aplicaciones foliares de N-P-K como complemento; en Brasil, son rutinarias las aplicaciones foliares de zinc ya que la deficiencia de este elemento es muy común en los suelos donde se cultiva café en ese país; también se ha tenido éxito con aplicaciones para la corrección de las deficiencias de boro o manganeso (Santinato,1989).

Las experiencias con la fertilización foliar en café en Colombia permiten concluir lo siguiente:

- No se justifica la fertilización foliar en almácigos.
- Por las bajas cantidades de nutrientes que se pueden utilizar en la fertilización foliar, ésta no sustituye parcial ni totalmente a la fertilización edáfica en cafetales en producción.
- En caso de deficiencias severas se puede complementar la fertilización edáfica con la foliar; además, es posible corregir la deficiencia de micronutrientes como zinc y boro mediante aplicaciones al follaje.
- Para el agricultor, el objetivo es mantener los nutrientes en un nivel que le permita máximo beneficio en forma continuada, lo cual significa que los nutrientes no deben ser un factor limitativo en ningún momento, desde la siembra hasta la cosecha.

La fuente original de la materia orgánica del suelo son los restos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, así como la masa microbiana. Estos restos vegetales y animales denominados como “polímeros de compuestos orgánicos”, son simplemente “materia orgánica fresca” que bajo la acción de factores edáficos, climáticos y biológicos son sometidos a un constante proceso de transformación (Labrador, 1996).

Inicialmente estos restos son degradados por vía biológica hasta componentes elementales de sus constituyentes básicos: proteínas, hidratos de carbono, ácidos orgánicos complejos, entre otros. Es decir, se produce una simplificación de su estructura a compuestos más sencillos y más solubles. Parte de estos compuestos sufren por la acción microbiana un proceso de mineralización, pasando a formas inorgánicas solubles (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , entre otros) o bien gaseosa (CO_2 , NH_4^+). Algunos de estos compuestos pueden ser “reorganizados” en un proceso inverso que rige la mineralización, produciéndose una inmovilización temporal de nutrientes - fundamentalmente nitrógeno- en la biomasa microbiana, pero reincorporándose posteriormente a los compuestos húmicos, quedando sujetos a la dinámica de éste dentro del suelo (Labrador, 1996; Meléndez y Soto, 2003).

El uso y aplicación de materia orgánica en agricultura es milenaria, sin embargo paulatinamente fue experimentando una disminución considerable, probablemente a causa de la introducción de los fertilizantes químicos que producían mayores cosechas a menor costo. En los últimos años se ha observado un creciente interés sobre la materia orgánica, habiendo experimentado su mercado un gran auge ligado al tema de los residuos orgánicos que encuentran así, una aplicación y el desarrollo de nuevas tecnologías (Meléndez y Soto, 2003).

Abonos orgánicos

Se entiende por abono orgánico todo material de origen orgánico utilizado para fertilización de cultivos o como mejorador de suelos. Se incluyen dentro de los abonos orgánicos materiales como la gallinaza, la pulpa del café, coberturas como el kudzú o *Arachis*, compost y ácidos húmicos.

Abonos para la agricultura orgánica

Son aquellos abonos que se pueden utilizar en la agricultura orgánica. Su utilización está regulada por

las normas internacionales de certificación. No todos los abonos orgánicos pueden ser utilizados en agricultura orgánica, por ejemplo, el uso de excretas de animales totalmente estabulados está prohibido por la regulación europea (U.E., 2005). Los ácidos húmicos permitidos son solo aquellos cuyo extractante haya sido KOH o NaOH (OMRI, 2005). Y por el contrario, enmiendas como el carbonato de calcio o fertilizantes como la roca fosfórica que aunque no son abonos orgánicos, se permiten en agricultura orgánica (OMRI, 2005). La legislación de la agricultura orgánica de los Estados Unidos (NOP 7 CFR, Parte 205) (USDA, 2000), definió las condiciones de compostaje requeridas para el manejo de excretas frescas, lo que restringe aún más el uso de abonos orgánicos permitidos para agricultura orgánica. Lo anterior creó por supuesto en los productores, la necesidad de conocer muy bien las normas y el mercado al que va a ser dirigido su producto.

Compost

Proceso biológico controlado de transformación de la materia orgánica a través de la descomposición aeróbica. Se denomina Compost al producto resultante del proceso de compostaje. Co-compostaje: proceso de compostaje de lodos urbanos junto con otros residuos orgánicos sólidos.

Bocashi

Receta japonesa de producción de abono orgánico, de volteos frecuentes y temperaturas por debajo de los 45-50°C, hasta que la actividad microbiana disminuye al disminuir la humedad del material (Tabla 9.1). Se considera un proceso de compostaje incompleto. Algunos autores lo han considerado un abono orgánico “fermentado”, sin embargo es un proceso enteramente aeróbico. El bocashi fue introducido en el país por técnicos japoneses y la mayoría de los productores practican la receta original: 1 saco de gallinaza, 1 saco de granza, 2 sacos de tierra, 1 saco de semolina de arroz o salvado, 1 saco de carbón molido y 1 litro de melaza (Figuroa *et al.*, 1998), Sin

embargo, dada las limitaciones para adquirir algunos de estos materiales, los agricultores han ido sustituyendo éstas con ingredientes locales. Por tanto, actualmente se llama “bocashi” al sistema de producción y no a la receta original (Figuroa *et al.*, 1998).

Vermicompost o lombrinaza

Proceso biológico de transformación de la materia orgánica a través de una descomposición aeróbica realizada principalmente por lombrices (Dávila y Ramírez, 1996). Se conoce como lombricultura la biotecnología orientada a la utilización de la lombriz como una herramienta de trabajo para el reciclaje de todo tipo de materia orgánica.

Biofertilizantes

Fertilizantes que aumentan el contenido de nutrimentos en el suelo o que aumentan la disponibilidad de los mismos. Entre estos el más conocido es el de bacterias fijadoras de nitrógeno como *Rhizobium*, pero también se pueden incluir otros productos como micorrizas, fijadoras de nitrógeno no simbióticas, etc.

Biofermentos

Fertilizantes en su mayoría para uso foliar, que se preparan a partir de fermentaciones de materiales orgánicos. En el país son de uso común los biofermentos a base de excretas de ganado vacuno, o biofermentos de frutas.

Abono verde

Son plantas que se incorporan al suelo en estado verde, con el fin de incrementar los contenidos de materia orgánica y aumentar el nitrógeno disponible en el suelo; este tipo de abono es importante cuando las plantas utilizadas son leguminosas, por el aporte de N que hacen al suelo (Jiménez, 2004).

Tabla 9.1. Comparación entre el proceso de compostaje y “bocashi”

Características	COMPOST	BOCASHI
Producto final	Sustancias húmicas	Materia orgánica en descomposición
Temperaturas máximas	65-70 °C	45-50 °C
Humedad	60% durante todo el proceso	Inicial 60%, desciende rápidamente
Frecuencia de volteo	Regida por temperatura y CO ₂	Una o dos veces al día
Duración del proceso	De 1 a 2 meses	De 1 a 2 semanas

Mulch vegetal

Residuos de cosechas u otros residuos vegetales esparcidos sobre la superficie del suelo; se diferencia del nombre genérico mulch que abarca otros materiales diferentes a los residuos vegetales como plásticos, cartones, piedras, entre otros.

Características de los abonos orgánicos

Todos los compuestos orgánicos tienen carbono pero no todos los compuestos con carbono son clasificados como compuestos orgánicos. Por ejemplo, el monóxido de carbono (CO) y el carbonato de sodio (Na₂CO₃) son compuestos inorgánicos que contienen carbono. Paradójicamente a algunos compuestos orgánicos, algunas veces erróneamente, se les consideran inorgánicos como es el caso de la urea (NH₂CONH₂) (Dibb, 2002; Herrera, 2001).

En el mundo de los fertilizantes se tiene la idea que la urea es un compuesto inorgánico, pero no es cierto, la urea es un compuesto orgánico que todos los seres vivos producen; la causa de la confusión es que la urea se puede sintetizar en el laboratorio a partir de dióxido de carbono (CO₂) y amoníaco (NH₃) bajo condiciones de alta presión y temperatura, es así como se produce comercialmente.

Comúnmente a los fertilizantes de origen mineral como el cloruro de potasio (KCl) o algunos sulfatos se les denomina “químicos”, sin embargo estos fertilizantes se encuentran en forma natural en la corteza terrestre, se extraen de minas y se comercializan sin ningún proceso de síntesis química. A estos fertilizantes se les ha clasificado incorrectamente como compuestos “químicos sintéticos” similares a otro tipo de agroquímicos como herbicidas, fungicidas, etc. lo que ha dado una impresión negativa de los mismos. Al final, todos los fertilizantes orgánicos o minerales participarán en las reacciones químicas en la solución del suelo independientemente de su origen (Dibb, 2002; Herrera, 2001).

Las formas químicas como los nutrimentos son utilizados por las plantas se presentan en la Tabla 9.2. Casi todos los compuestos que están en la solución del suelo están presentes como especies iónicas. La trayectoria que toman los nutrimentos para llegar a formas disponibles para la planta puede ser compleja y variada. Los procesos por los cuales estos nutrimentos se transforman dentro del ambiente se denominan ciclos. Sin importar la forma en la cual estos elementos entran primero en sus respectivos ciclos, éstos tienen que convertirse en las formas inorgánicas (Tabla 9.2), para que puedan ser utilizados por las plantas. De esta forma, todos los alimentos consumidos por los humanos, ya sean plantas o animales que se alimentan de ellas, fueron producidos por nutrimentos inorgánicos, aun cuando un nutrimento cualquiera haya sido entregado al suelo en forma orgánica.

Tabla 9.2. Formas químicas como los nutrientes son utilizados por las plantas.

Elemento	Forma orgánica tomada por la planta	Elemento	Forma orgánica tomada por la planta
N	NO ₃ ⁻ ; NH ₄ ⁺	Cl	Cl ⁻
P	HPO ₄ ²⁻ ; H ₂ PO ₄ ⁻	Cu	Bu ²⁺
K	K ⁺	Fe	Fe ²⁺ ; Fe ³⁺
Ca	Ca ²⁺	Mn	Mn ²⁺ ; Fe ³⁺
Mg	Mg ²⁺	Mo	Mo, o ₄ ³⁺
S	SO ₄ ²⁻	Zn	Zn ²⁺
B	H ₃ BO ₃ , B ₃ O ₇ ²⁻ , H ₂ BO ₃ , HBO ₃ , BO ₃ ³⁻		

El término orgánico se ha hecho popular en los últimos años, especialmente en relación con los alimentos. Algunas veces se usa para explicar que los alimentos producidos con fuentes orgánicas de nutrientes tienen ciertas características especiales, beneficios especiales para la salud y quizá mayor valor nutricional. Esta designación de orgánico, en relación al uso de nutrientes, se refiere a la práctica de suplementar a la planta nutrientes solamente con adiciones de residuos de cultivos o desechos animales en lugar de las fuentes químicas de nutrientes, lo cual implica que unos son naturales y que los otros son sintéticos.

Cualquier esfuerzo para identificar los alimentos desde el punto de vista del tipo de nutriente utilizado es prácticamente imposible, debido a que, sin importar si la fuente es orgánica o inorgánica, todos los nutrientes son químicos. Sin embargo, todos son naturales y existen en la naturaleza. Todos los nutrientes suplementados en forma orgánica solamente son absorbidos por la planta después de que han sido convertidos a formas inorgánicas. Las diferentes fuentes de nutrientes requieren diferente manejo para su uso eficiente.

Todos los alimentos, sin importar como han sido producidos, contienen compuestos de C y por tanto son orgánicos. El C proviene del CO_2 de la atmósfera que rodea a la planta, no de ningún C orgánico que haya sido colocado o que exista en el suelo, excepto cuando es liberado por descomposición de la materia orgánica en forma de CO_2 que regresa a la atmósfera. Los procesos de la naturaleza están reciclando continuamente los nutrientes, de una forma u otra. Por ejemplo, la principal fuente de N es el N atmosférico. Esto es cierto ya sea que el N sea transferido por procesos de fijación biológica, por fijación industrial, o depositado por los animales que se alimentaron de los pastos y granos cultivados en el suelo.

Existen aproximadamente 84 millones de kilogramos de N por cada hectárea de atmósfera sobre la tierra. Sin embargo, este N debe transformarse en NH_4^+ o NO_3^- antes que pueda ser absorbido por la planta para su beneficio. Todas estas formas de N son naturales ya sea que provengan de fuentes orgánicas o inorgánicas. Los nutrientes esenciales se encuentran abrumadoramente en forma inorgánica en su estado natural. Solamente una pequeña porción se encuentra en forma orgánica en un momento dado. Colocándose en la perspectiva de tiempo geológico, los elementos existen solo momentáneamente en estado orgánico y pronto regresan a su más abundante estado inorgánico, sin embargo, ambos estados son naturales (Dibb, 2002; Herrera, 2001; Primavesi, 1984).

Como el N, todos los otros nutrientes pasan a través de ciclos naturales, siguiendo varias trayectorias hacia su destino final de ser absorbidos y utilizados por las

plantas que producen todos los alimentos para humanos y animales. En el proceso, ciertos nutrientes como N, P y S se mueven alternadamente entre las fases orgánica e inorgánica. Años de estudios han demostrado que el crecimiento de plantas, animales y humanos puede a menudo afectarse debido a inadecuadas cantidades (deficiencias) de los elementos esenciales. En humanos y animales, las deficiencias se controlan cambiando la dieta a una que incluya alimentos ricos en los nutrientes requeridos (orgánico) o por medio de suplementos minerales (inorgánico). En las plantas, las deficiencias se controlan entregando estos nutrientes con fertilizantes, los cuales pueden provenir de la abundante fuente inorgánica o de la pequeña fuente orgánica, dependiendo de la disponibilidad, costo y conveniencia. A menudo, el uso de las fuentes en forma conjunta es la solución más eficiente y económica.

Cuando se suplementan los nutrientes en forma orgánica, estos todavía deben pasar los ciclos de conversión para llegar a la fase inorgánica antes de que estén disponibles para las plantas. Por otro lado, los fertilizantes inorgánicos se suplementan en forma soluble o lentamente soluble, de modo que la planta puede tomar los nutrientes cuando los necesita. Esta revisión de los conceptos científicos en relación con los nutrientes busca aclarar esta compleja situación y desea disipar muchos de los mitos y misterios que existen en relación a los nutrientes orgánicos e inorgánicos. Las dos fuentes de nutrientes tienen un papel común y complementario en la producción de alimentos, fibras y combustibles para una población en constante crecimiento (Dibb, 2002; Herrera, 2001).

Composición química de algunos abonos orgánicos

En la Tabla 9.3, se presenta la composición química de algunos materiales empleados como abonos orgánicos.

Nitrógeno. El N, es el elemento más apreciado para valorar la calidad de los abonos orgánicos; se ha establecido un valor crítico de 4% en base seca para la sumatoria de N, P y K. Los países desarrollados establecen un valor crítico de 6%. El N es fundamental en la construcción de la biomasa, por la complejidad de su dinámica química (nitrificación-denitrificación) y por las posibilidades de pérdidas por lixiviación y volatilización. Abonos orgánicos de buena calidad deben tener entre 2%-3% de nitrógeno y que sea estable. La gallinaza tiene 4%-6% cuando está pura, con alto contenido de amonio, éste es volátil y fitotóxico. Por ello se aplica, 2 ó 3 semanas antes de la siembra.

Fósforo: Valores por encima del 1% se consideran adecuados y por encima del 2% excelentes. La cachaza como residuo agroindustrial, cuyo proceso recibe P y Ca, alcanza valores de P del 2%. Por su efecto rizogénico, le da un gran valor, como componente de sustratos.

Potasio: Propio de los residuos suculentos de frutas, verduras, pulpa de café y de las gramíneas en estado joven y consecuentemente alto en la bovinaza. Es el elemento de mayor disponibilidad, se puede perder por lixiviación.

Calcio: Juega un papel importante en la estructura del suelo. Las crucíferas y el bleado, almacenan éste en gran cantidad. La cachaza, por su proceso industrial de origen tiene un alto valor de este nutrimento.

Elementos menores: Se debe esperar la siguiente escala de contenido de elementos menores en los tejidos vegetales: Fe>Mn>Zn>Cu>B, la cual es similar a la de los suelos.

Caracterización del abono orgánico

Antes de aplicar un abono orgánico se debe identificar sus características, entre las cuales se destaca:

- **Composición mineral.** La composición mineral es muy variable; para conocer su valor nutricional se debe

realizar un análisis químico a fin de establecer los contenidos de elementos esenciales, especialmente de N, P, K, Ca, Mg y elementos menores (Fe, Zn, Mn, Cu, B). Algunos estiércoles de animales, pueden presentar niveles altos de Zn y Cu y pueden llegar a ser fitotóxicos.

- **Humedad.** Para aplicar abonos sólidos el contenido de humedad debe ser menor del 15%; esto facilita y disminuye el costo de transporte y de su aplicación.
- **Contenido de ácidos fúlvicos.** Está relacionado con la movilidad del abono en el suelo y con la facilidad que tenga éste de solubilizar metales tóxicos; en un abono orgánico adecuado, su contenido no debe ser menor al 3,0%.
- **Relación C:N.** Con base en los contenidos de C y N totales; es una medida de la facilidad de la mineralización del abono.
- **pH.** Es necesario conocer el pH del abono orgánico, para prevenir problemas de acidificación o alcalinización que pueda tener el abono sobre el suelo.
- **Conductividad eléctrica.** Frecuentemente es alta en los abonos; se debe tener en cuenta para evitar una posible salinización del suelo o problemas de toxicidad en las plantas debida a la aplicación de grandes cantidades de sales.

Tabla 9.3. Composición química de abonos orgánicos (Federacafé, 1990; Figueroa *et al.*, 1998).

Abono orgánico	M.O(%)	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (mg.kg ⁻¹)
Pulpa de café compostada	55,0	4,2	0,3	5,3	0,9	0,2	
Pulpa de café lombricompuesto	56,0	3,7	0,3	9,6	1,2	0,2	
Gallinaza		2,9	3,1	2,8	3,0-8,0	0,6-1,3	
Pollinaza		4,3	1,5	2,1	3,2	0,6	1,7
Porquinaza		4,0-6,0	0,4	0,9	2,0-4,0	0,4	0,14
Harina de plumas de pollos		4,6	0,38	0,23	0,23	0,20	1,4
Harina de sangre		12,0	0,10	0,30	0,5	0,06	0,13
Cachaza	76,0	0,55	1,1-1,3	0,7-0,9	2,4	0,82	0,19
Bovinaza	5,3	5,0	0,1	1,6	13,2	5,0	
Equinaza		1,2	0,1	1,6	15,7	2,8	
Ovinaza		1,6	0,1	2,3	11,7	3,7	

- C.I.C. Es deseable que un abono orgánico tenga una CIC alta.
- Cantidad de materiales inertes.
- Cantidad de partículas que componen el material.
- Contenido de metabolitos potencialmente tóxicos.
- Contenido de patógenos, tanto de plantas como de animales.

Efectos benéficos de la materia orgánica (M.O.)

El efecto benéfico de la M.O. sobre la fertilidad de los suelos especialmente sobre aquellos altamente meteorizados es de mucha importancia con relación a sus contenidos, pues está demostrado que incrementos mínimos benefician simultáneamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Aunque la interacción de estas tres propiedades dificulta la cuantificación del efecto benéfico de la M.O., es también muy factible que los distintos componentes de la M.O. estén afectando simultáneamente y en forma distinta la dinámica, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Aunque no se conoce a ciencia cierta la naturaleza de los procesos implicados ni las fracciones de M.O. que afectan las propiedades del suelo, es claro que ésta presenta efectos benéficos (Labrador, 1996; Primavesi, 1984).

Efectos sobre las propiedades físicas del suelo

- La materia orgánica da el color oscuro al suelo, como consecuencia del contenido de humus, lo que le permite absorber hasta el 80% de la radiación solar.
- Da resistencia a los agregados del suelo (cohesión), las sustancias húmicas sobre las arcillas actúan como cemento de unión de las partículas minerales, haciendo más ligeros los suelos arcillosos favoreciendo la porosidad, la aireación y la circulación del agua y más compactos los arenosos, dando mayor estabilidad a los agregados.
- La materia orgánica provee de sustancias agregantes del suelo, haciéndolo grumoso, más estable estructuralmente, lo cual ofrece resistencia a la acción degradativa de la lluvia y los vientos.

- La materia orgánica aumenta la permeabilidad del suelo al agua y al aire, debido a su acción positiva sobre la porosidad y sobre la actividad de la fauna edáfica (grietas, galerías).
- Disminuye la densidad aparente.
- Aumenta la capacidad del suelo para retener agua, lo cual permite al suelo almacenar más agua durante la épocas húmedas y reducir en períodos cálidos las pérdidas por evaporación (se mantiene el balance hídrico del suelo).

Efectos sobre las propiedades químicas del suelo

- Proveen de ácidos orgánicos y alcoholes; durante su descomposición sirven de fuente de carbono a los microorganismos de vida libre; fijadores de N, posibilitando así su fijación.
- Aumenta la C.I.C.
- La materia orgánica aumenta el poder “Buffer”, es decir, la resistencia contra las variaciones bruscas del pH, lo que es especialmente importante en tierras fertilizadas químicamente.
- Es fuente importante de micro y macronutrientes especialmente N, P, y S, siendo particularmente importante el P orgánico en los suelos ácidos.
- Actúa como agente quelatante del aluminio.
- Actúa como quelatante de micronutrientes previniendo su lixiviación y evita la toxicidad de los mismos.
- Regula los fenómenos de adsorción especialmente la inactivación de plaguicidas.

Efectos sobre las propiedades biológicas del suelo

- Los ácidos húmicos regulan el estado óxido reductor del medio en que se desarrollan las plantas; así, cuando el oxígeno es insuficiente, facilitan la respiración radical de la planta en forma de “Humatos”.
- La materia orgánica favorece el intercambio del oxígeno que condiciona la respiración de las raíces y de los organismos del suelo y que intervienen en las reacciones de oxidación y del dióxido de carbono, producto de la actividad respiratoria vegetal y

microbiana, necesario para que los organismos autótrofos realicen sus síntesis orgánicas.

- La materia orgánica provee alimento a los organismos activos en la descomposición, produciendo antibióticos que protegen a las plantas de plagas y enfermedades, contribuyendo a la salud vegetal.
- Asegura la producción de CO₂. El desprendimiento de dióxido de carbono a la atmósfera edáfica, acidifica las soluciones del suelo y favorece la solubilización de compuestos minerales de baja solubilidad con lo que se asegura la disponibilidad para la planta de ciertos minerales que de otra forma serían inaccesibles.
- La materia orgánica produce sustancias intermedias en su descomposición, que pueden ser absorbidas por las plantas, aumentando el crecimiento.
- Es fuente energética de los microorganismos especialmente por sus compuestos de carbono.
- Estimula el desarrollo radical y la actividad de los macro y microorganismos del suelo.

Liberación de nutrientes y requerimientos de las plantas

La liberación de nutrientes y los requerimientos por las plantas, se denomina sincronía. Los sistemas naturales conservan nutrientes y tienen pérdidas pequeñas, pero frecuentemente las pérdidas de los sistemas agrícolas son grandes. Para aumentar la productividad se tiene que conservar los nutrientes existentes o aplicar insumos de bajo costo.

La sincronía ocurre cuando la liberación del nutriente es similar a lo requerido por la planta, tanto en espacio como en el tiempo. Se aplica el concepto a los ciclos de N, P, y S, donde un manejo adecuado puede aumentar (mineralización) o inhibir (inmovilización) la cantidad de nutriente disponible a la planta.

Manejo para mejorar la sincronía

En el uso de residuos orgánicos, el manejo de la sincronía es clave para la sostenibilidad de los agroecosistemas, y deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

Planta: Tipo de cultivo, sistema radical, demanda, plantas que modifican los patrones de liberación de nutrientes.

Manejo de fertilizantes: Liberación controlada o lenta, aplicaciones divididas, inhibidores de nitrificación, mezclas de abonos orgánicos e inorgánicos

Insumos orgánicos: Usos de residuos de cultivos, abonos verdes, estiércoles, compost, desechos)

En la sincronía y la liberación de nutrientes, es fundamental el conocimiento de la tasa o velocidad de descomposición de los residuos orgánicos.

Descomposición de la materia orgánica en el suelo

Las transformaciones por la que pasa el carbono comprende esencialmente dos fases, una de fijación y otra de regeneración (Figura 2).

La fijación del gas carbónico atmosférico es efectuado por los organismos fotosintéticos, plantas verdes, algas y bacterias autótrofas. Esta fijación finaliza con la síntesis de compuestos hidrocarbonados de complejidad variable, amidas, hemicelulosas, celulosas, ligninas, proteínas, aceites y otros polímeros. Estos compuestos retornan al suelo con los residuos vegetales; y son utilizados por los microorganismos que regeneran a gas carbónico durante reacciones de oxidación respiratoria, en las cuales se emplea energía (Mendonca y Gomide, 2005).

La velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo, independiente de la forma en que se encuentre, está condicionada por numerosos factores (Jiménez, 2004; Labrador, 1996; Mendonca y Gomide, 2005; Primavesi, 1984; Burbano, 1989), entre ellos se encuentra:

- Origen y naturaleza de la materia orgánica
- Agentes responsables de la descomposición
- Humedad
- Temperatura
- Acidez del suelo
- Contenido de nutrientes del suelo

Origen y naturaleza de la materia orgánica

La materia orgánica del suelo proviene, casi en su totalidad, de residuos vegetales cuya composición media varía entre las diferentes especies vegetales; dentro de una misma especie varía con la edad y nutrición de la planta (Mendonca y Gomide, 2005).

Los principales componentes de los vegetales, en porcentaje de peso seco, son:

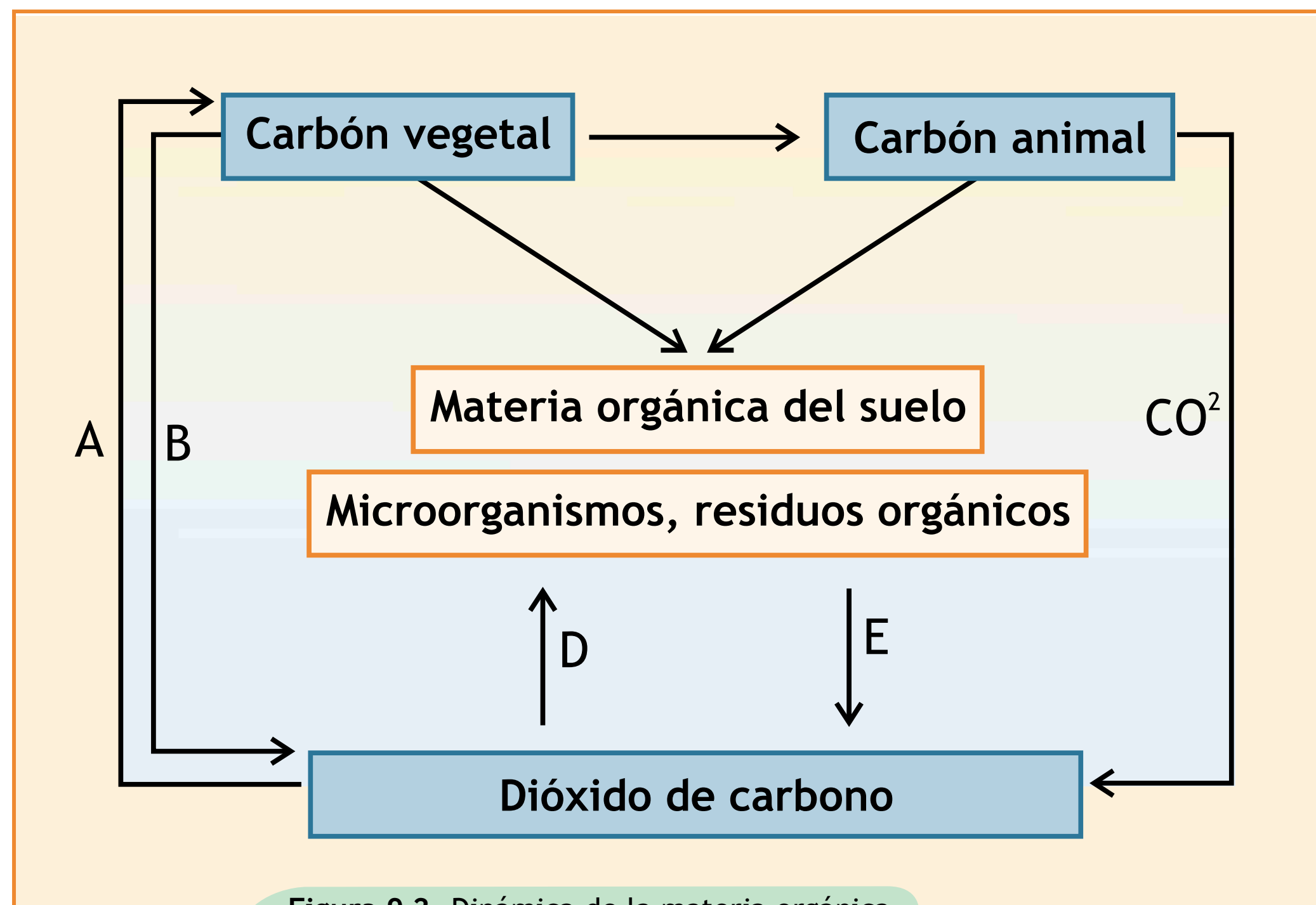


Figura 9.2. Dinámica de la materia orgánica.

- Celulosa 15% a 60%
- Hemicelulosa 10% a 30%
- Lignina 5% a 30%
- Fracción soluble en agua 5% a 30%
(azúcares simples, aminoácidos, ácidos alifáticos)
- Fracción soluble en alcohol 1% a 15%
(aceites, resinas, algunos pigmentos, ceras)
- Proteínas 1% a 10%
- Constituyentes minerales 1% a 12%

Durante la descomposición de la materia orgánica por la acción de las enzimas y los microorganismos, algunos compuestos son más rápidamente utilizados que otros, siendo la fracción soluble en el agua y las proteínas los primeros compuestos en ser metabolizados. La celulosa y hemicelulosa no desaparecen con la misma intensidad mas la permanencia de estos compuestos en el suelo es relativamente corta. Las ligninas son altamente resistentes, tornándose a veces como las más abundantes en la materia orgánica en descomposición.

La relación carbono/nitrógeno (C/N) puede determinar muchas veces la cinética de la descomposición, entonces debe considerarse la dinámica de la relación C/N bajo dos aspectos:

a. La relación C/N de los microorganismos y

b. La relación C/N de la materia orgánica

En el primer caso la relación C/N de las células microbianas es muy variable; por ejemplo, la relación C/N en hongos es de 10:1; en actinomicetos de 8:1; en bacteria aeróbicas 5:1 y en las anaerobias 6:1.

Durante la descomposición de la materia orgánica en el suelo la relación C/N disminuye, y parte del C orgánico se pierde en forma de CO₂ (Figura 9.2).

La Figura 9.3, representa la curva de descomposición de la materia orgánica del suelo, correlacionándola con la relación C/N y con los fenómenos de inmovilización y mineralización.

La relación C/N es variable de acuerdo con las especies y la edad de las mismas y es un buen indicador de la susceptibilidad de la hojarasca a ser degradada. En general, el rango óptimo en los residuos orgánicos de leguminosas se encuentra entre 25-30/1. Si el residuo de partida es rico en carbono y pobre en nitrógeno, la descomposición será lenta. En el caso contrario, en altas concentraciones de nitrógeno, éste se transformará en amoníaco, impidiendo la correcta actividad biológica.

Si el material final obtenido tras la descomposición, tiene un valor C/N alto (>35), indica que no ha sufrido una descomposición completa y, si el índice es muy bajo (<25), puede ser por una excesiva mineralización. Una relación C/N en los residuos orgánicos mayor a 30 es

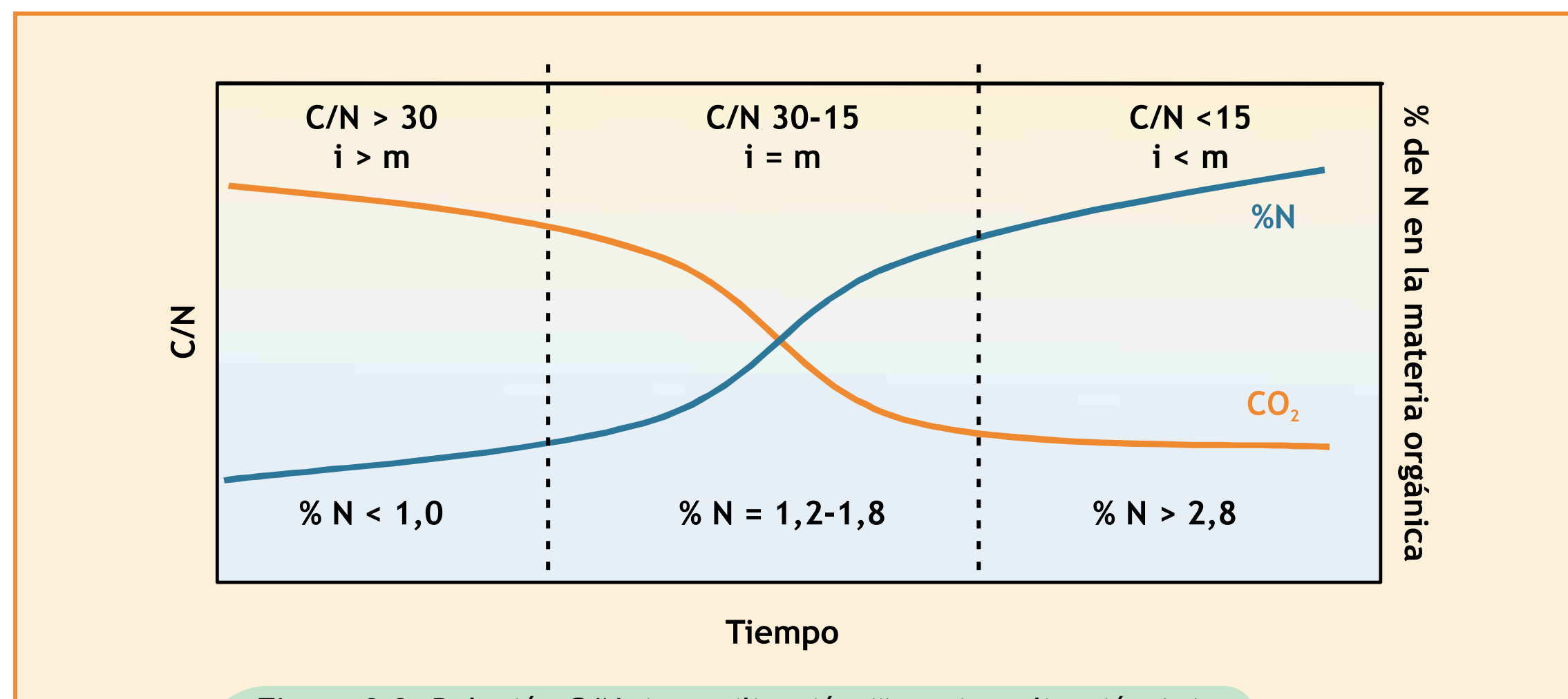


Figura 9.3. Relación C/N, inmovilización (i) y mineralización (m), durante la descomposición de la materia orgánica. (Alexander, 1977 y Broadbent, 1954 citados por Mendonca y Gomide, 2005).

alta; entre 15 y 30 es equilibrada y una menor de 15 es baja (Mendonca y Gomide, 2005); aunque todo ello depende de las características del material de partida (Farfán, 1995; Farfán y Urrego, 2004; De las Salas, 1987; Fassbender, 1987; Fassbender y Bornemiza, 1987; Oliver *et al.*, 2002; Sariyildiz, 2003).

Es de anotar que las relaciones C/P/S y N/Lignina y los tenores de fenoles, también tienen influencia en la tasa de descomposición del material orgánico adicionado al suelo como materia orgánica propiamente dicha.

Coefficiente asimilatorio de carbono (C). Cuando se aplican residuos vegetales con una elevada relación C/N, en una primera fase, se produce una inmovilización del nitrógeno presente en el suelo por parte de los hongos encargados de la destrucción de esos restos, principalmente celulósicos o lignínicos. Cuando la citada relación va bajando al producirse el consumo del carbono, utilizado como fuente de energía de todos los microorganismos del suelo, se inicia una mayor actividad bacteriana que va liberando nitrógeno mineral a la velocidad que los hongos lo inmovilizan. Al mismo tiempo se produce la muerte de muchos de ellos y su transformación por parte de las bacterias con liberación del nitrógeno que posee. En ese lapso de tiempo el nitrógeno del suelo no sufre variaciones significativas. Finalmente, cuando la relación C/N es baja los compuestos presentes son atacados con mayor facilidad por las bacterias que equilibran su población, por lo que va resultando un excedente de nitrógeno que queda en el suelo en forma mineral, se produce una liberación del elemento que será utilizado por las plantas (Figura 9.4).

Los coeficientes asimilatorios o consumo de carbono orgánico en porcentaje, por algunos microorganismos

son:

Hongos	30% a 40%
Actinomicetos	15% a 30%
Bacterias	1% a 15%

En términos prácticos, puede considerarse un coeficiente asimilatorio de carbono orgánico del 35%, este coeficiente asimilatorio tiene mucha utilidad práctica.

EJEMPLO: Descomposición de residuos secos de sorgo.

- El sorgo contiene 40% de C y 0,7% de N.
- Considerando un coeficiente de asimilación de C del 35%, en 100 kg de materia seca, resulta 14,0 kg de C asimilable: (40 kg de C total * 0,35)
- Considerando una relación C/N de los microorganismos de 10:1, se obtiene que se necesitan 1,4 kg de N para la descomposición de 100 kg de residuos de sorgo: C/N = 14/10).
- El material residual del sorgo (100 kg), contienen 0,7 kg de N disponible.
- Como se requiere de 1,4 kg de N para la descomposición de los residuos y solo se tiene 0,7 kg; entonces hay déficit de 0,7 kg de N para la completa descomposición.

En este caso los microorganismos retiran del suelo el N disponible, provocando un fenómeno de inmovilización de N del suelo y compitiendo así con las plantas por este elemento.

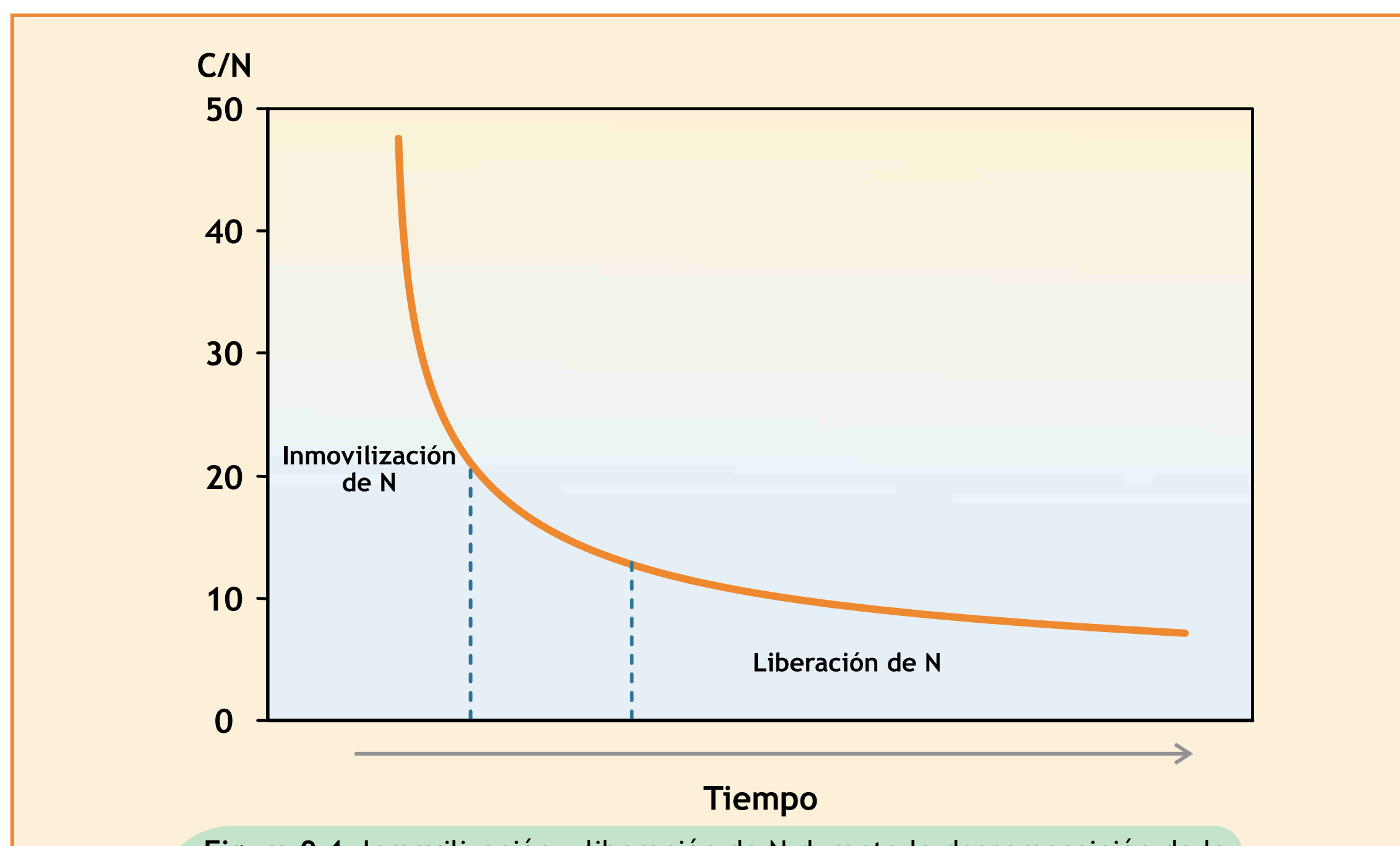


Figura 9.4. Inmovilización y liberación de N durante la descomposición de la materia orgánica.

Esta es una de las razones de la controversia existente entre la conveniencia de enterrar las pajas de los cereales o destruirlas. En terrenos con una actividad biológica intensa y con contenidos en nitrógeno mineral altos, su incorporación al suelo resulta beneficiosa pues facilita el desarrollo microbiano e incrementa el contenido orgánico del suelo, tras esa primera fase depresiva que el suelo y las plantas soportan bien. En caso contrario tendrá unos efectos negativos, pues se transformará con excesiva lentitud y provocará grandes huecos en la superficie del suelo que impedirán el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas recién germinadas (Fassbender, 1987; Herrera, 2001; Labrador, 1996; Primavesi, 1984; Burbano, 1989).

Resultados de investigación

• **Descomposición de residuos vegetales y transferencia de nutrientes por *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* y *Tephrosia candida* empleadas como abonos verdes en café.**

En la Estación Central Naranjal de Cenicafé, se evaluó la transferencia de nutrientes y tasa de descomposición de residuos vegetales producidos por *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* y *Tephrosia candida* establecidas a 172.000, 86.000 y 60.000 plantas.ha⁻¹ (Jiménez *et al.*, 2005(b)).

Se obtuvo que el modelo exponencial simple es el que representa la descomposición de la biomasa seca producida por las tres leguminosas, Figura 9.5. La producción media de biomasa seca en *Cajanus cajan* fue de 7,6 t.ha⁻¹, en *Crotalaria juncea* de 4,2 t/ha⁻¹ y en *Tephrosia candida* de 5,4 t.ha⁻¹. La tasa relativa de

descomposición mensual (k) en *C. cajan* fluctuó entre 0,18 y 0,21, en *C. juncea* entre 0,25 y 0,32 y en *T. candida* entre 0,18 y 0,21; La densidad de siembra no afectó la tasa de descomposición de los residuos vegetales de *C. cajan* y *T. candida*.

Los residuos vegetales de *C. cajan* se descomponen más lentamente ($K = 0,20$) que los residuos de *C. juncea* y *T. candida* ($K = 0,29$ y $0,26$ respectivamente); La fracción de la materia orgánica no descompuesta (K_1) en un período de 180 días fluctuó entre 28% y 34% en *C. cajan*, entre el 11% y 22% en *C. juncea* y entre el 19% y 22% en *T. candida* (Tabla 9.4).

El Coeficiente Isohúmico (k_1) es definido como la fracción de la materia orgánica que queda sin descomponerse o se descompone muy lentamente después de un período de tiempo dado; el k_1 depende esencialmente, pero no exclusivamente de las características del residuo orgánico (Labrador, 1996); es un indicador del estado o “madurez” del abono orgánico. Debido a la naturaleza

Tabla 9.4. Comparación de las tasas de descomposición mensual (k) y Coeficiente Isohúmico (k_1) de tres especies leguminosas, en un período 180 días (Jiménez *et al.*, 2005 (b)).

Especies	$K \text{ mes}^{-1}$	Coeficiente Isohúmico (k_1)
<i>Cajanus cajan</i>	0,20 b	0,31 b
<i>Crotalaria juncea</i>	0,29 a	0,18 a
<i>Tephrosia candida</i>	0,26 a	0,21 a

Letras distintas indican diferencia significativa según prueba Tukey al 5%

de sus componentes como ligninas y proteínas, este coeficiente se determina a través de la fracción orgánica del residuo vegetal y que es relativamente resistente a la descomposición biológica.

En un período de 180 días se descompone e incorpora al suelo el 71,2% de los residuos producidos por *C. cajan*, el 85% de los producidos por *C. juncea* y el 80,6% de los producidos por *T. candida* (Tabla 9.5). Las tasas máximas de descomposición se presentan en los 30 primeros días, 23,1%, 40,2% y 28,8% en *C. cajan*, *C. juncea* y *T. candida* respectivamente. Las tasa mas bajas de descomposición se registraron entre los 120 y 180 días, 7,7%, 6,5% y 7,6% en *C. cajan*, *C. juncea* y *T. candida*, respectivamente.

En un período de 180 días de descomposición la biomasa seca producida por *C. cajan* transfiere al suelo el 57,8% del N, 79,8% del P, el 96,8% del K, el 25% del Ca y el 65,7% del Mg contenido en los residuos vegetales (Tabla 9.6). En este mismo período, la descomposición de los residuos vegetales producidos por *C. juncea*, transfiere al suelo el 84,6% del N, 89,1% del P, 98,8% del K, el 74,3% del Ca y el 90,0% del Mg contenido en estos residuos (Tabla 9.7). Transcurridos 180 días los residuos vegetales producidos por *T. Candida*, transfirieren al suelo el 78,3% del N, el 84,2% del P, el 97,9 % del K, el 50,9% del Ca y el 86,9% del Mg contenidos en los residuos (Tabla 9.8) (Jiménez *et al.*, 2005 (b)).

Tabla 9.5. Porcentaje de biomasa de las leguminosas incorporada al suelo cada 30 días durante 180 días (Jiménez *et al.*, 2005 (b)).

Especies	Materia seca (t.ha ⁻¹ .año ⁻¹)	Período (días)					
		30	60	90	120	150	180
<i>C. cajan</i>	7,7	23,1	36,8	48,1	57,4	64,9	71,2
<i>C. juncea</i>	4,2	40,2	55,0	66,2	74,6	80,8	85,5
<i>T. candida</i>	5,4	28,8	45,2	57,7	67,4	74,9	80,6

Tabla 9.6. Concentración (%) y contenido total (kg) de nutrientes en la biomasa seca total producida por *C. cajan* y transferencia (%) mensual al suelo (Jiménez *et al.*, 2005 (b)).

Especie	Nutriente	(%)	kg	Período (días)						R ²	
				0	30	60	90	120	150		180
<i>C. cajan</i>	Nitrógeno	3,1	238,1	0,0	20,9	31,8	59,9	59,3	61,9	57,8	0,66
	Fósforo	0,3	21,2	0,0	37,1	33,0	70,2	79,1	78,1	79,8	0,75
	Potasio	1,7	127,3	0,0	7,8	44,5	89,4	95,5	94,8	96,8	0,75
	Calcio	0,5	35,0	0,0	-74,4	-26,7	5,3	19,5	26,2	24,9	0,76
	Magnesio	0,1	10,9	0,0	-28,0	2,0	37,4	55,8	58,6	65,7	0,86

*Valores negativos indican no transferencia del elemento

Tabla 9.7. Concentración (%) y contenido total (kg) de nutrientes en la biomasa seca total producida por *C. juncea* y transferencia (%) mensual al suelo (Jiménez *et al.*, 2005 (b)).

Especie	Nutriente	(%)	kg	Período (días)						R ²	
				0	30	60	90	120	150		180
<i>C. juncea</i>	Nitrógeno	3,6	151,6	0,0	58,3	63,2	79,5	81,6	80,1	84,6	0,7
	Fósforo	0,4	16,1	0,0	51,4	54,6	73,2	77,4	81,8	89,1	0,9
	Potasio	2,4	97,4	0,0	54,9	85,2	96,7	98,2	97,8	98,8	0,6
	Calcio	0,8	32,1	0,0	8,3	29,7	53,5	56,8	61,7	74,3	0,9
	Magnesio	0,2	9,7	0,0	17,6	40,4	68,5	74,9	81,0	90,0	0,9

• **Descomposición de residuos y transferencia de nutrientes de *Coffea arabica*, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, en Sistemas Agroforestales**

En sistemas agroforestales con café, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, en la Subestación Experimental Paraguaicito, se evaluó la descomposición de la materia seca y transferencia de nutrientes en cada especie (Farfán y Urrego, 2004; Farfán y Urrego, s. f.). Las densidades de siembra fueron de 4.444 y 278 plantas por ha para el café y el sombrío.

La producción media de biomasa seca en café fue de 4,35 t.ha⁻¹, en *Cordia alliodora* de 3,46 t.ha⁻¹, en *Pinus oocarpa* de 6,67 t.ha⁻¹ y en *Eucalyptus grandis* de 6,39 t.ha⁻¹ (Urrego y Farfán, 2000 y 2002) (Tabla 9.9).

El modelo que mejor representó la tasa de descomposición de los residuos vegetales fue exponencial simple (Figura 9.6).

La tasa relativa de descomposición mensual (*k*) en café a libre exposición solar fue de 1,0 en café bajo sombrío fluctuó entre 0,87 y 1,08, en *C. alliodora* fue de 0,78, en *P. oocarpa* de 0,26 y en *E. grandis* de 0,72. La fracción de la materia orgánica no descompuesta (*K_n*) en un período de 365 días fluctuó entre el 34% y 42% en café bajo sus diferentes sistemas de cultivo; en *C. alliodora* fue del 46%, en *P. oocarpa* del 77% y en *E. grandis* del 49% (Figura 9.6 y Tabla 9.10).

El sistema de cultivo de café, libre exposición solar o bajo sombrío no afecta la tasa de descomposición de sus residuos vegetales. Los residuos vegetales de *P. oocarpa* se descomponen más lentamente (*K*=0,20) que los residuos de *C. alliodora* y *E. grandis*.

Tabla 9.8. Concentración (%) y contenido total (kg) de nutrientes en la biomasa seca total producida por *T. candida* y transferencia (%) mensual al suelo (Jiménez *et al.*, 2005 (b)).

Especie	Nutriente	%	kg	Período (días)						R ²	
				0	30	60	90	120	150		180
<i>C. juncea</i>	Nitrógeno	3,6	196,3	0,0	47,9	56,4	73,5	78,2	79,4	78,3	0,8
	Fósforo	0,3	17,6	0,0	42,0	44,3	71,5	78,6	84,0	84,2	0,8
	Potasio	2,0	107,7	0,0	48,8	63,6	95,2	98,1	97,7	97,9	0,7
	Calcio	0,7	37,1	0,0	3,2	-4,4	22,8	43,5	51,8	50,9	0,8
	Magnesio	0,2	10,3	0,0	22,0	22,5	59,4	77,1	83,6	86,9	0,9

Tabla 9.9. Aporte de biomasa seca por tres especies forestales y el café en dos períodos de evaluación. Subestación Experimental Paraguaicito (Urrego y Farfán, 2000 y 2002).

Especies	Producción de biomasa seca (t.ha ⁻¹)		
	1 ^{er} año	2 ^o año	Media
Café a libre exposición	1,47	8,40	4,94
Café bajo sombrío de nogal	1,42	6,16	3,79
Café bajo sombrío de pino	1,61	7,52	4,56
Café bajo sombrío de eucalipto	1,32	6,90	4,11
<i>Cordia alliodora</i> (nogal)	1,99	4,93	3,46
<i>Pinus oocarpa</i> (pino)*	0,00	6,67	6,67
<i>Eucalyptus grandis</i> (eucalipto)	4,67	8,12	6,39

*De pino se presenta la producción de biomasa seca solo del segundo año

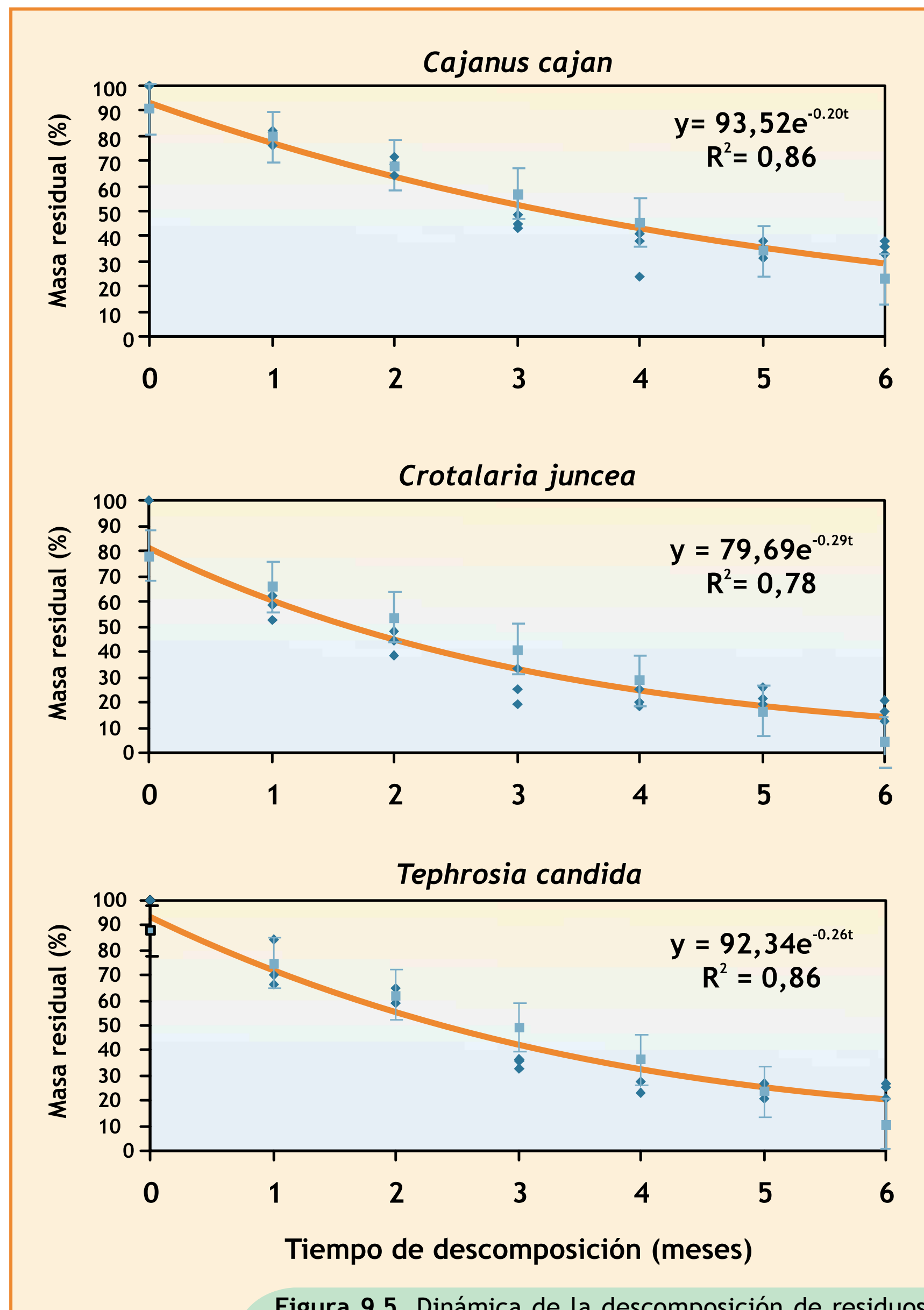


Figura 9.5. Dinámica de la descomposición de residuos vegetales de tres especies leguminosas, Estación Central Naranjal (Jiménez *et al.*, 2005).

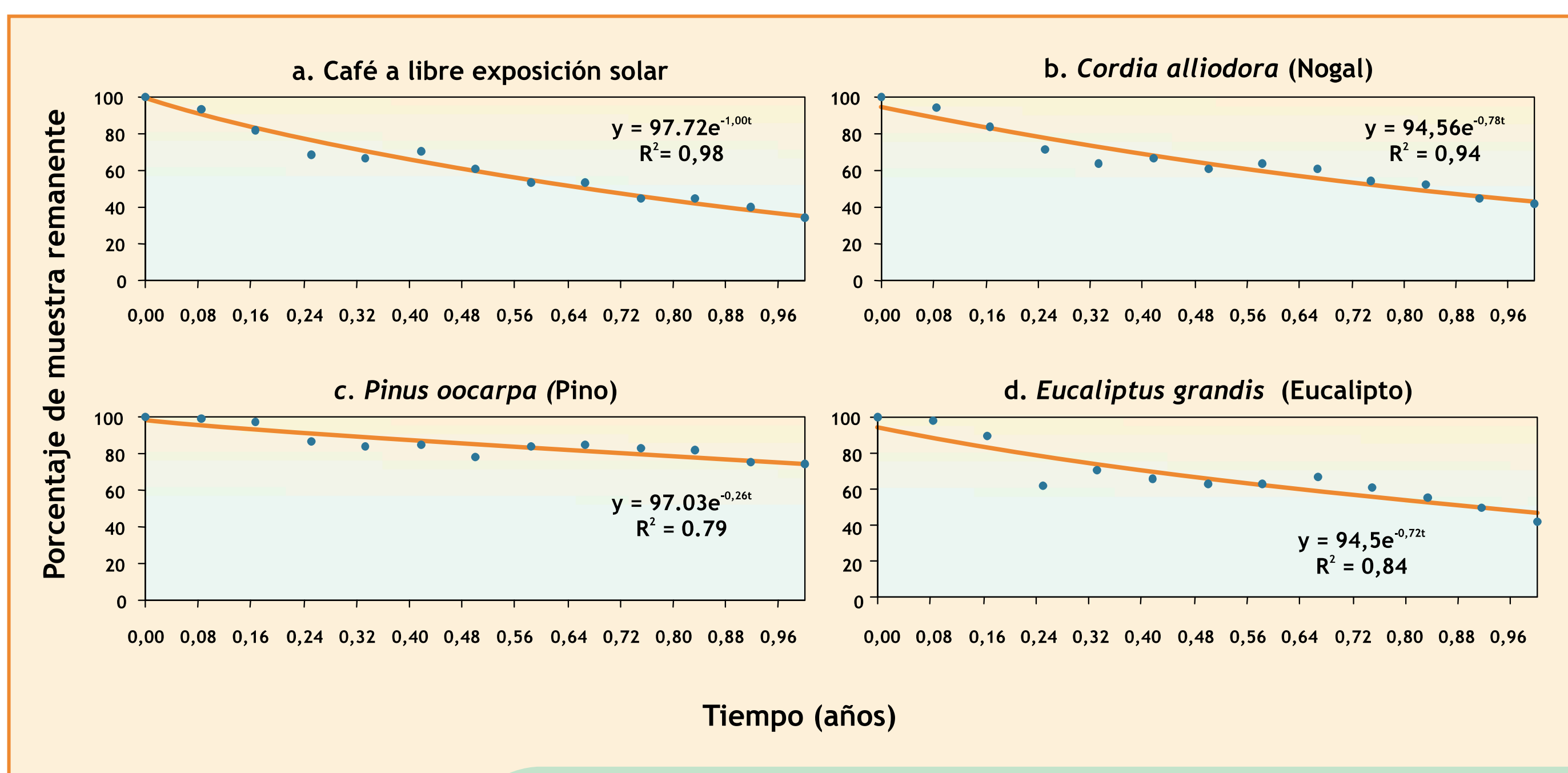


Figura 9.6. Dinámica de la descomposición de residuos vegetales de café y tres especies forestales, Subestación Experimental Paraguaicito (Quindío) (Farfán y Urrego, s.f.).

En un período de 365 días se descompone e incorpora al suelo el 65,1% de los residuos producidos por café, el 56,7% de los producidos por *C. alliodora*, el 25,2% de los producidos por *P. oocarpa* y el 54,0% de los producidos por *E. grandis* (Tabla 9.11).

En un período de 365 días de descomposición la biomasa seca producida por el café, transfiere al suelo el 64,8% del N, 82,9% del P, el 96,7% del K, el 34,3% del Ca y el 63,1% del Mg contenido en los residuos vegetales (Tabla 9.12).

En este mismo período, la descomposición de los residuos vegetales producidos por *C. alliodora*, transfiere al suelo el 33,3% del N, 54,4% del P, 93,6% del K, el 54,0% del Ca y

el 67,% del Mg contenido en estos residuos (Tabla 9.13). Al finalizar los 365 días los residuos vegetales producidos por *P. oocarpa*, no transfirieron al suelo N, P, Ca y Mg; solo liberaron el 64,5% del K presente en los residuos (Tabla 9.14).

En un período de 365 días de descomposición la biomasa seca producida por *E. grandis*, transfiere al suelo el 23,6% del N, 35,5% del P, el 89,3% del K, el 28,5% del Ca y el 39,9% del Mg contenido en los residuos vegetales (Tabla 9.15).

La materia orgánica del suelo constituye la principal fuente de C para los microorganismos, pero no todo el C de la materia orgánica es transformado por los microorganismos; gran parte se pierde en forma de CO₂

Tabla 9.10. Coeficientes de descomposición e isohúmicos de café y tres especies forestales (Farfán y Urrego, s.f.).

Tratamientos	Tasa de descomposición de residuos			Coeficiente Isohúmico (K ¹)
	Modelos	K.año ⁻¹	R ²	
Café a libre exposición	$y = 97,7e^{-1,0t}$	1,00 a	0,98**	0,37 a
Café con sombrío de nogal	$y = 92,9e^{-1,0t}$	1,01 a	0,98	0,36 a
Café con sombrío de pino	$y = 88,0e^{-0,9t}$	0,87 a	0,98	0,42 a
Café con sombrío de eucalipto	$y = 97,3e^{-1,1t}$	1,08 a	0,97	0,34 a
<i>Cordia alliodora</i> (nogal)	$y = 94,6e^{-0,8t}$	0,78 a	0,99	0,46 a
<i>Pinus oocarpa</i> (pino)	$y = 97,0e^{-0,3t}$	0,26 b	1,00	0,77 b
<i>Eucaliptus grandis</i> (eucalipto)	$y = 94,5e^{-0,7t}$	0,72 a	0,99	0,49 a

k: Tasa de descomposición anual

** p<0,001

Tabla 9.11. Porcentaje de la biomasa inicial descompuesta e incorporada al suelo mensualmente (Farfán y Urrego, s.f.).

Especies	N° de Días												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	365
Café a libre exposición	0,0	9,8	17,6	23,9	29,7	35,8	40,7	45,3	50,0	53,8	57,4	61,1	64,1
Café con sombrío de nogal	0,0	14,3	21,8	27,8	33,4	39,2	43,9	48,3	52,8	56,4	59,8	63,3	66,2
Café con sombrío de pino	0,0	17,9	24,0	29,2	33,9	38,9	43,0	46,8	50,8	54,1	57,2	60,4	63,1
Café con sombrío de eucalipto	0,0	10,7	19,0	25,7	31,9	38,2	43,3	48,0	52,8	56,7	60,3	64,0	67,0
<i>Cordia alliodora</i> (nogal)	0,0	11,2	17,2	22,2	26,9	31,9	36,0	39,9	43,9	47,3	50,5	53,9	56,7
<i>Pinus oocarpa</i> (pino)	0,0	5,0	7,2	9,1	10,9	13,0	14,8	16,6	18,5	20,2	21,8	23,6	25,2
<i>Eucaliptus grandis</i> (eucalipto)	0,0	10,8	16,4	21,1	25,5	30,2	34,1	37,8	41,7	44,9	48,0	51,3	54,0

Tabla 9.12. Concentración (%), contenido total (kg) de nutrientes en la biomasa seca media producida por Café y transferencia (%) mensual al suelo (Farfán y Urrego, s.f.).

Nut.	(%)	Kg	Período (días)													R ²	p
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	365		
N	2,83	123,1	0,0	34,0	34,2	39,1	42,4	41,4	43,6	49,7	51,4	53,2	50,7	62,3	64,8	0,77	*
P	0,21	9,1	0,0	59,4	60,8	68,3	69,1	68,6	68,0	73,0	70,2	75,9	77,4	81,3	82,9	0,51	*
K	1,25	54,4	0,0	17,7	65,5	88,9	89,5	86,5	91,9	90,5	93,2	96,5	94,7	96,4	96,7	0,58	*
Ca	1,75	74,8	0,0	4,1	7,9	16,9	5,9	-7,1	7,9	8,7	4,6	20,9	7,1	24,1	34,3	0,41	*
Mg	0,35	15,2	0,0	24,9	14,2	18,6	38,3	30,3	39,1	46,9	54,0	47,1	48,3	63,8	63,1	0,88	*

* p<0,01 en todos los casos

Tabla 9.13. Concentración (%) y contenido total (kg) de nutrientes en la biomasa seca media producida por *C. alliodora* y transferencia (%) mensual al suelo (Farfán y Urrego, s.f.).

Nut.	(%)	Kg	Período (días)													R ²	p
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360		
N	1,44	49,8	0,0	8,3	19,6	17,1	31,5	21,6	17,2	4,0	18,2	9,3	20,1	26,7	33,2	0,23	0,09
P	0,10	3,5	0,0	5,7	7,7	28,1	16,7	0,3	27,4	29,6	26,8	29,9	47,2	55,1	54,4	0,79	*
K	0,80	27,7	0,0	-2,6	67,5	75,7	84,8	87,5	87,1	86,4	93,1	91,9	91,4	93,3	93,6	0,58	*
Ca	5,50	190,3	0,0	33,1	37,5	25,5	24,3	23,9	20,8	20,9	23,5	42,1	37,6	51,8	54,0	0,47	*
Mg	0,80	27,7	0,0	18,7	5,7	37,1	28,7	31,1	36,5	39,2	42,1	52,1	53,8	74,2	67,7	0,89	*

* p<0,01 en todos los casos

Tabla 9.14. Concentración (%) y contenido total (kg) de nutrientes en la biomasa seca media producida por *P. oocarpa* y transferencia (%) mensual al suelo, (Farfán y Urrego, s.f.).

Nut.	(%)	Kg	Período (días)													R ²	p
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360		
N	0,48	32,0	0,0	-8,9 ¹	-17,4	4,0	-1,2	-7,8	-35,7	-18,3	-18,6	25,9	-39,2	-18,0	-3,6	0,03	0,58
P	0,02	1,3	0,0	1,3	2,9	13,0	-25,6	-69,7	-96,3	-25,3	-27,5	-24,1	-22,3	-51,1	-24,3	0,16	0,17
K	0,18	12,0	0,0	45,2	19,1	32,4	44,2	5,7	47,7	62,9	76,4	63,2	68,3	58,0	65,5	0,58	*
Ca	0,45	30,0	0,0	-18,4	-20,9	1,4	3,2	-11,2	-20,4	-22,5	-15,2	-3,0	-15,9	-14,2	-3,9	0,01	0,74
Mg	0,06	4,0	0,0	-48,0	-29,5	-16,0	-25,6	-69,7	-43,9	-39,2	-41,7	-37,9	-49,4	-51,1	-36,8	0,22	0,10

* p<0,01

¹ Valores negativos indican inmovilización del nutriente

Tabla 9.15. Concentración (%) y contenido total (kg) de nutrientes en la biomasa seca media producida por *E. grandis* y transferencia (%) mensual al suelo (Farfán y Urrego, s.f.).

Nut.	(%)	Kg	Período (días)													R ²	p		
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360				
N	0,78	49,8	0,0	3,0	-5,7	30,0	0,9	-4,2	-8,2	6,3	-	12,5	2,3	-	11,2	10,9	23,6	0,01	0,75
P	0,05	3,2	0,0	21,4	28,3	50,3	15,7	7,5	11,8	25,0	-	20,6	15,3	12,2	21,1	35,5	0,00	0,96	
K	0,59	37,7	0,0	36,7	33,1	75,8	69,0	66,4	75,4	65,0	64,8	76,4	89,8	90,8	89,3	0,70	*		
Ca	1,07	68,4	0,0	-9,3	8,7	31,5	35,7	20,3	25,8	24,6	-4,6	-1,8	5,6	16,1	28,5	0,02	0,61		
Mg	0,14	8,9	0,0	-5,3	4,0	42,3	14,7	10,3	19,0	19,6	4,3	9,3	17,7	36,6	39,9	0,31	0,05		

* p<0,01

durante la mineralización. La cantidad de carbono en la materia orgánica asimilable por los microorganismos es variable y depende del microorganismo y grupos de microorganismos considerados (Mendonca y Gomide, 2005).

Agentes responsables de la descomposición

La microbiota del suelo, que en su mayoría es heterótrofa, depende de una fuente de carbono orgánico para poder crecer y multiplicarse; así prácticamente todos los hongos, actinomicetos y la mayoría de bacterias y protozoarios participan intensamente de los procesos de descomposición de la materia orgánica. Los compuestos orgánicos y minerales del suelo sufren transformaciones ya sea por procesos de naturaleza química, físicoquímica o biológica, en estos intervienen directa o indirectamente microorganismos o los complejos enzimáticos del suelo.

Humedad del suelo

Todos los microorganismos del suelo dependen del agua para su crecimiento y desarrollo. Gran parte de los microorganismos del suelo son aeróbicos, por tanto, el tenor de agua del suelo influye en la descomposición de la materia orgánica. Los dos extremos de humedad del suelo, encharcamiento o desecación, provocan una disminución en la velocidad de la descomposición de la materia orgánica, debido a que en estas condiciones se reduce las actividades microbiana y enzimática; la actividad microbiana se ve reducida en el primer caso por la falta de oxígeno y en el segundo por la falta de agua.

Temperatura del suelo

El rango de temperatura para el crecimiento microbiano, está entre -0,5 y 68°C, siendo un rango bastante amplio, lo cual no quiere decir que todos los microorganismos crecen bien en ella. Algunos crecen bien a temperatura mas bajas (0,5 -20°C) organismos psicrófilos; otros a temperaturas medias (14 - 45°C) mesófilos y otros se desarrollan mejor a temperaturas más elevadas (42 - 68°C) microorganismos termófilos.

Los microorganismos mesófilos y termófilos son los más activos en la descomposición de la materia orgánica. En suelos tropicales y considerando el efecto de la temperatura, se presenta una velocidad de descomposición de la materia orgánica 5 a 10 veces mayor que en suelos con clima templado. El grupo termófilo de descomponedores presenta particular importancia en el caso de la producción de abono orgánico, mediante compostaje.

Acidez y contenido de nutrientes del suelo

El pH del suelo también tiene influencia en la velocidad de descomposición de la materia orgánica; la mayoría de los microorganismos del suelo tiene su pH óptimo de actuación, alrededor del neutro. Además de la exigencia de C y N por los microorganismos del suelo, otros elementos igualmente son necesarios, en especial P, S y microelementos.

En conclusión, la tasa de descomposición no depende solo de los factores ambientales como la temperatura, la humedad y la precipitación y de las características del suelo, de su humedad y de las poblaciones microbianas; las diferencias en descomposición de los materiales

vegetales están en función de la composición química o de sus concentraciones de nutrimentos y de la relación C/N.

Fertilización orgánica de cafetales

En almácigos

Pulpa de café descompuesta. En la etapa de almácigo, los principales problemas presentados son: nutrición, mancha de hierro, nematodos, entre otros. Algunos de estos problemas pueden ser controlados con la utilización de materia orgánica para el llenado de bolsas en los almácigos, siendo la principal fuente de esta la pulpa de café descompuesta. Experimentalmente se ha demostrado que con la adición de pulpa de café descompuesta para el llenado de bolsas en los almácigos, las plantas crecen sanas y vigorosas (Concepción, 1982; Mestre, 1973; Mestre, 1977; Valencia, 1972; Valencia y Salazar, 1993).

Mestre (1973), comparó el crecimiento de plántulas de café en almácigos aplicando diferentes cantidades de pulpa descompuesta y proveniente de fosas de almacenamiento, obteniendo que a medida que aumentan las cantidades de pulpa descompuesta, aumenta el tamaño y peso seco de raíces; recomienda, para la preparación del sustrato mezclas de tierra mas pulpa descompuesta en proporción 1:1. O que la proporción óptima entre pulpa y tierra de la mezcla para llenar las bolsas es de 70 partes de pulpa descompuesta y 30 de tierra por volumen; esto equivale a la mezcla de 40 partes de pulpa seca y 60 partes de tierra por volumen; puede presentarse un efecto negativo en crecimiento cuando las cantidades de pulpa descompuesta son superiores a la cantidad óptima (Mestre, 1977).

Parra (1968) evaluó el efecto de la pulpa descompuesta sobre el crecimiento de plántulas de café tanto aisladamente como en combinación con tres elementos nutritivos: N, P y K, obtuvo que con aplicaciones de N disminuye significativamente el crecimiento de la parte aérea y de las raíces, alcanzando esta acción detrimental hasta un 24% sobre el testigo. La semejanza entre la respuesta a la pulpa de café aplicada al suelo y la fertilización con P hace presumir que la pulpa actúa como material de naturaleza fosfórica.

Cadena (1982) estudió el efecto de la pulpa de café sobre el control de la mancha de hierro (*Cercospora coffeicola* Berk y Cooke) usando como sustrato suelo mezclado con pulpa descompuesta en distintas proporciones (0, 25, 50, 75 y 100% de pulpa), estos tratamientos se

compararon con y sin control químico; evaluó Índice de infección, porcentaje de defoliación y peso seco de la parte aérea de la planta. A los 6 meses encontró que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos con pulpa con y sin fungicida en cuanto a control de la mancha de hierro, pero sí con el tratamiento sin pulpa y sin fungicida. El mejor tratamiento fue el de una parte de pulpa (25%) y tres partes (75%) de suelo.

Empleo de otros residuos orgánicos en la producción de almácigos de café

- **Gallinaza.** La gallinaza también constituye un excelente abono orgánico para almácigos de café, las plantas provenientes de almácigos con gallinaza presentan mejor vigor y desarrollo que las que provienen de almácigos hechos directamente con suelo; Investigaciones realizadas por Salazar y Mestre (1990) con el objetivo de estimar la cantidad óptima de gallinaza que se agrega al suelo para los almácigos de café comparándola con la pulpa, obtuvieron los mayores valores de peso seco de la parte aérea, peso seco de raíces y altura de las plantas cuando la mezcla de tierra y gallinaza se hace en proporción volumétrica de 3/4 partes de suelo y 1/4 de gallinaza, y se obtienen similares resultados cuando la mezcla se hace en proporción 1:1 de tierra:pulpa descompuesta en volumen.

- **Cenichaza.** La cenichaza, residuo industrial en el proceso de elaboración del azúcar, es una excelente fuente como abono orgánico probada en hortalizas, frutales, ornamentales, etc. Salazar y Mestre (1991) estimaron que la cantidad óptima de cenichaza que se debe mezclar al suelo como aporte de abono orgánico para la construcción de almácigos de café, está entre el 25 y el 75% de cenichaza, pero por costos la mejor combinación es la de 3 partes de suelo por una parte de cenichaza.

- **Estiércol de ganado.** Salazar y Montesino (1994) evaluaron el estiércol de ganado como fuente de materia orgánica para almácigos de café, el efecto de los tratamientos fue evaluado en cuanto a altura de las planta y peso seco de la parte aérea y de raíces de las plantas a los seis meses de edad; de los resultados obtuvieron que cuando la mezcla de estiércol de ganado y suelo para el llenado de las bolsas se hace en la proporción de volúmenes de 1/4 parte de estiércol de ganado y 3/4 partes de suelo; el peso seco y la altura de las plantas presentan sus mayores valores.

- **Desechos del gasógeno.** Una de las formas más sencillas de la utilización de la pulpa del café, además de su uso como abono es la obtención de combustible o biogas mediante digestión anaeróbica. Esta digestión a partir de desperdicios agrícolas permite producir energía, obtener abonos orgánicos, protegiendo al mismo tiempo

el medio ambiente (Bedoya y Salazar, 1985). Con el objetivo de evaluar el efecto del material de desecho del gasógeno a base de pulpa sobre el desarrollo de las plantas y encontrar la mezcla óptima de este material con la tierra para el llenado de bolsas para los almácigos Bedoya y Salazar (1985) obtuvieron que, el residuo de fermentación metánica a base de pulpa es un abono adecuado para almácigos de café, ya que con este material de desecho en mezcla con la tierra de las bolsas para almácigos aumentan notoriamente la altura y el peso seco total de las plantas. Cuando se emplea este material se obtienen plantas aptas para ser trasplantadas a los 5 meses de edad. El mejor desarrollo se obtiene cuando se hace la mezcla con 3/4 partes del material de desecho y 1/4 parte de suelo.

- **Conclusión:** Con el suministro de las cantidades apropiadas de materia orgánica en mezcla con el suelo para el llenado de bolsas para el almácigo, empleando el tamaño de bolsa adecuado, 17 cm x 23 cm, se hacen innecesarias las aplicaciones para el control de enfermedades con fungicidas, las aplicaciones de fertilizantes vía edáfica o foliar y se obtienen plantas con el desarrollo y vigor apto para ser trasplantada al campo definitivo a la edad recomendada, - 5 a 6 meses en el almácigo (Farfán, 1995; Federación Nacional de Cafeteros, 1990; Salazar, 1992; Uribe y Mestre, 1978).

En establecimiento y producción del café

- **Pulpa de café compostada.** Uribe y Salazar (1983) encontraron que con aplicaciones superficiales de 6 y 12 kg de pulpa por planta y por año se obtenían producciones similares que con fertilización química y que la aplicación de pulpa dentro del hoyo de siembra solamente es necesario cuando las deficiencias de materia orgánica así lo indiquen. Si se aplican 64 t.ha⁻¹ de pulpa, el tiempo de permanencia de los elementos individuales, N, Ca, Mg y K, con base en un valor residual del 25% del original aplicado, este fue de 6 meses para el N; un año para el Ca y Mg y de cuatro meses para el K; por tanto el tiempo de degradación de la pulpa puede fijarse en seis meses o sea el tiempo de sustentación del N (López, 1966).

En una observación sobre producción de café vía orgánica, el cual fue establecido en la Estación Central Naranjal, durante el ciclo productivo comprendido entre 1996 y el 2000, con café variedad Colombia con una densidad de 4.500 plantas.ha⁻¹, se obtuvieron las producciones presentadas en la Tabla 9.16 (Giraldo *et al.*, 2000).

La producción acumulada de cinco cosechas fue de 13.638,8 kg de café pergamino seco.ha⁻¹, de las cuales se obtuvo 24.251,0 kg de pulpa; con esta pulpa y mediante la lombriz roja californiana se produjo 8.972,9 kg de lombricompost. Si se aplica 2,0 kg de lombrinaza por

planta por año, con el lombricompost obtenido alcanzaría para fertilizar al año, aproximadamente la quinta parte del café; o se tendría que acumular durante cinco años la lombrinaza obtenida para fertilizar el lote en su totalidad.

El abono orgánico a base de pulpa que un caficultor elabora en su finca, no es suficiente para cumplir con un plan de fertilización orgánica, por tanto deben tenerse otras alternativas para cumplir con este plan, como: Aplicación de las dosis adecuadas de abonos orgánicos con base en los análisis de suelos, abonos verdes, residuos de cosechas, cultivos intercalados (maíz, frijol, plátano), aporte de material orgánico por las especies arbóreas empleadas como sombrío, entre otras.

- **Lombrinaza a partir de pulpa de café.** Con el objeto de determinar la dosis óptima de lombricompost a partir de pulpa para la fertilización orgánica de café a libre exposición, se han realizado estudios, con los cuales se evaluaron cuatro dosis de lombrinaza y se compararon con el café fertilizado según los resultados de los análisis de suelos y el café sin fertilizar. Estos resultados se presentan en la Tabla 9.17.

Los resultados de la producción media de cuatro cosechas en la Subestación Experimental Paraguaicito y de cinco cosechas en la Subestación experimental La Catalina, indican que con la aplicación de 2,0 a 3,0 kg de lombricompost por planta por año, se obtienen producciones iguales que cuando se aplica al café fertilizantes químicos basados en los análisis de suelos. En la Estación Central Naranjal, la producción es mayor cuando se aplican de 2,0 a 3,0 kg de lombrinaza por planta por año que cuando se hace fertilización química (Cenicafé, 2002b).

Para garantizar el suministro adecuado de nutrimentos, en sistemas de producción de café cuya fertilización se base en la aplicación de lombricompost de pulpa de café, la dosis a aplicar debe ser de 2 a 3 kg de lombricompost por planta por año, fraccionada en dos aplicaciones (1,0 a 1,5 kg en el primer semestre del año y de 1,0 a 1,5 kg de lombrinaza en el segundo semestre).

- **Abonos verdes.** En la Estación Central Naranjal se evaluó el aporte de biomasa seca, concentración y contenido de nutrimentos en las especies leguminosas *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* y *Tephrosia candida*, especies que pueden ser empleadas como abonos verdes en café (Jiménez *et al.*, 2005(a)). Las densidades de siembra de las leguminosas fueron de 172.000, 86.000 y 60.000 plantas por ha, el café se estableció con 5.000 plantas por ha (dos tallos por sitio). Los resultados se presentan en las Tablas 9.18 y 9.19.

Biomasa seca. La producción media de materia seca (acumulada de tres cortes por año en las tres densidades), fue de 7,6 t.ha⁻¹ en guandul y 4,2 t.ha⁻¹ en crotalaria,

Tabla 9.16. Producciones de café orgánico (kg cps.ha⁻¹.año⁻¹) durante los años 1996 a 2000 en la Estación Central Naranjal (Caldas) (Giraldo *et al.*, 2000).

Año	Producción (kg de cps.ha ⁻¹)	Pulpa de café (kg)	Lombriabono (kg)	plantas a fertilizar
1996	2.951,3	5.247,7	1.941,6	970,8
1997	3.136,3	5.576,3	2.063,2	1.031,6
1998	3.091,3	5.496,8	2.033,8	1.016,9
1999	2.585,0	4.596,9	1.700,9	850,4
2000	1.875,0	3.333,3	1.233,3	616,7
Acumulado	13.638,8	24.251,0	8.972,9	4.486,4

Tabla 9.17. Producciones (kg c.p.s.ha⁻¹.año⁻¹) medias de café fertilizado con lombricompost en las Subestaciones Experimentales Paraguaicito (Quindío), La Catalina (Risaralda) y en la Estación Central Naranjal (Caldas). (Giraldo *et al.*, 2000(b)).

Dosis de lombricompost	Producciones medias (kg cps.ha ⁻¹ .año ⁻¹)		
	S.E. Paraguaicito (4 cosechas)	S.E. La Catalina (5 cosechas)	E.C. Naranjal (5 cosechas)
0,5 kg	3272,5 bc*	3011,3 b	3255,0 b
1,0 kg	3388,8 abc	3546,3 ab	3871,3 ab
2,0 kg	3717,5 ab	3766,3 a	4133,8 a
3,0 kg	3782,5 a	3965,0 a	4296,3 a
Con Fertilización	3633,8 ab	3972,5 a	3198,8 b
Sin fertilización	2973,8 c	3267,5 ab	2115,0 c

* Letras diferente indican diferencia estadística, según prueba Tukey al 5%

las cuales fueron diferentes estadísticamente; tefrosia con un solo corte en al año produjo 5,4 t.ha⁻¹, el cual no fue diferente al observado en las otras dos especies (Jiménez *et al.*, 2005).

Contenido de nutrimentos. Los contenidos de N fueron de 238,1; 151,6 y 196,3 kg.ha⁻¹.año⁻¹ en *C. cajan*, *C. juncea* y *T. candida* respectivamente. Los contenidos de P en las tres especies fueron de 21,2; 16,1 y 17,6 kg.ha⁻¹. Los de K de 127,3; 97,4 y 107,7 kg.ha⁻¹. Los de Ca 35,0; 32,1 y 37,1 kg.ha⁻¹ y los de Mg de 10,9; 9,7 y 10,3 kg.ha⁻¹ en *C. cajan*, *C. juncea* y *T. candida*, respectivamente .

Los abonos verdes son una alternativa complementaria a la fertilización del café. En un sistema de producción de café especial, para que el flujo de nutrimentos sea permanente, se debe hacer mínimo dos cortes al año a las leguminosas empleadas con este propósito, o realizar dos siembras de estas leguminosas en el año si las

plantas solo permiten hacer un corte, de manera que su total descomposición coincida con las épocas normales de fertilización del café (Jiménez, 2004; Jiménez *et al.*, 2005(a)).

• **Biomasa seca y ciclaje de nutrimentos en plátano asociado al café.** En la Subestación Experimental La Catalina se evaluó el efecto de la materia orgánica y el ciclaje de nutrimentos producida por la asociación de plátano sobre la producción de café con y sin aplicación de fertilizante. El café se estableció a densidades de 2.500 plantas por ha y el plátano a 278 plantas por hectárea (Farfán, 2005).

Biomasa seca. La biomasa seca de plátano acumulada durante cuatro ciclos productivos, en el café sin aplicación de fertilizante fue de 7,7 t.ha⁻¹ y en el café con aplicación de fertilizante de 5,7 t.ha⁻¹.

Tabla 9.18. Producción media de materia seca ($t \cdot ha^{-1}$) de tres especies leguminosas sembradas a tres densidades (Jiménez *et al.*, 2005(a)).

Densidad (Plantas por ha)	Producción de biomasa ($t \cdot ha^{-1}$)		
	Guandul	Crotalaria	Tefrosia
172.000	8,9	5,8	6,5
86.000	8,0	3,5	4,8
60.000	6,1	3,2	5,0
Producción media	7,6 a*	4,2 b	5,4 ab

* Medias con letra diferente, indican diferencias estadística según prueba Tukey al 5%.

Tabla 9.19. Contenido (kg) de nutrientes en el material vegetal producido en cada corte de las leguminosas (Jiménez *et al.*, 2005(a)).

Nutrimentos	Contenido ($kg \cdot ha^{-1}$) de nutrientes		
	Guandul	Crotalaria	Tefrosia
Nitrógeno	238,1	151,6	196,3
Fósforo	21,2	16,1	17,6
Potasio	127,3	97,4	107,7
Calcio	35,0	32,1	37,1
Magnesio	10,9	9,7	10,3

Ciclaje de nutrientes. La transferencia de nutrientes por la materia seca producida por el plátano en los cuatro ciclos productivos, al café sin aplicación de fertilizante fue de $84,7 \text{ kg de } N \cdot ha^{-1}$, $8,4 \text{ kg de } P \cdot ha^{-1}$, $323,4 \text{ kg de } K \cdot ha^{-1}$, $68,2 \text{ kg de } Ca \cdot ha^{-1}$ y de $8,9 \text{ kg de } Mg \cdot ha^{-1}$. El plátano asociado al café con aplicación de fertilizante, transfirió $83,7 \text{ kg de } N \cdot ha^{-1}$, $6,5 \text{ kg de } P \cdot ha^{-1}$, $238,1 \text{ kg de } K \cdot ha^{-1}$, $55,4 \text{ kg de } Ca \cdot ha^{-1}$ y $7,3 \text{ kg de } Mg \cdot ha^{-1}$.

De los resultados obtenidos del estudio se destaca que a partir de la descomposición de los residuos de plátano solamente se puede suplir parte del requerimiento del potasio, siendo necesario complementar para el resto de requerimientos nutricionales del café.

• **Aporte de materia orgánica y nutrientes en café bajo sombrío de guamo (*Inga sp.*).** En la Estación Central Naranjal de Cenicafé y en El Cairo, municipio del departamento del Valle del Cauca (Colombia), se evaluó el ingreso de materia orgánica y nutrientes del material vegetal (hojas, tallos, flores, frutos y otros órganos) de plantas de café y guamo en un sistema agroforestal (Cardona y Sadeghian, 2005).

Los residuos vegetales como materia seca de café y guamo que ingresa al sistema fueron $10,5 \text{ t} \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ en Naranjal y $11,2 \text{ t} \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ en El Cairo (Valle). El contenido de nutrientes ($kg \cdot ha^{-1}$) en este material, y que potencialmente puede ser devuelto al suelo, se presenta en la Tabla 9.20.

El aporte significativo de material orgánico contribuye a la formación de materia orgánica estable del suelo. Con la descomposición de la hojarasca proveniente del guamo, el café recibe aportes importantes de nutrientes, principalmente de N, Ca, Mg, y elementos menores. La capa de hojarasca que se forma en el café con sombrío de guamo, además de proporcionar gran cantidad de nutrientes, disminuye la pérdida de suelo por la erosión, reduce la presencia de arvenses y contribuye a la economía hídrica del suelo.

• **Aporte de biomasa seca y nutrientes por especies forestales empleadas como sombrío en café.** En dos estudios en los cuales se evaluó el efecto del sombrío sobre la producción de café, se registró el aporte de biomasa seca (hojarasca) y reciclaje de nutrientes por parte de los árboles (Urrego y Farfán, 2000), tanto de café como de sombra, estos resultados se presentan en la Tabla 9.21.

La producción media de biomasa seca por el café establecido a densidades de siembra de 4.444 plantas por hectárea y bajo sombrío fue de $4,8 \text{ t} \cdot ha^{-1}$ y los árboles de sombra nogal, pino y eucalipto, produjeron respectivamente 4,0; 3,3 y $6,4 \text{ t}$ de materia seca por ha y por año. Para la misma distancia de siembra del sombrío ($6,0 \times 6,0 \text{ m}$), pero en otro experimento y en la Estación Central Naranjal, el guamo produjo 57,0% más biomasa seca que el Nogal, Pino y Eucalipto (media de las tres especies). El guamo recicla 78,3%, 69,1%, 13,0% y 36,3% más N, P, K y Ca, respectivamente, que las tres especies forestales (Urrego y Farfán, 2000).

• **Efecto de la poda de *Erythrina fusca* como sombrío del café a diferentes niveles de fertilización.** En la Subestación Experimental de Pueblo Bello, se evaluó el efecto de la poda de *E. fusca* como sombrío del café sometido a diferentes niveles de fertilización. Los ciclos de podas fueron a los 90, 180 y 360 días y los niveles de fertilizante fueron de 0, 50% y 100% de la recomendación

Tabla 9.20. Contenido de nutrientes ($kg \cdot ha^{-1}$) en el material orgánico (Cardona y Sadeghian, 2005).

Nutriente	E. C. Naranjal	El Cairo (Valle)
Nitrógeno	199,2	219,4
Fósforo	7,7	13,8
Potasio	48,9	55,5
Calcio	158,1	187,1
Magnesio	27,3	30,7
Hierro	1,3	1,2
Manganeso	0,99	2,3
Zinc	0,21	0,19
Cobre	0,15	0,17
Boro	0,21	0,22

dada en el análisis de suelos; el café se sembró a distancias de 1,5 x 2,5 m (2.667 plantas por hectárea) y el sombrío a 3,0 x 5,0 m (667 plantas por hectárea). Los resultados de producción de café se presentan en la Tabla 9.22 y los de biomasa seca producida por *E. fusca* en la Tabla 9.23.

Con relación a los niveles de fertilización se observaron diferencias a favor de la mayor dosis. Se realizó un análisis a los siguientes tratamientos dentro de cada grupo, estos fueron:

Poda de *E. fusca* cada 90 días y 100% de la dosis de fertilizante

Poda de *E. fusca* cada 180 días y 100% de la dosis de fertilizante y

Poda de *E. fusca* cada 360 días y café sin fertilizar

Los resultados no mostraron diferencias, lo cual puede definir como mejor opción la siembra del café bajo sombra sometida a ciclos de poda anual y sin fertilización (Cenicafé, 2002a).

La biomasa cuantificada por hectárea en tratamientos de poda de ciclo anual fue de 11,8 toneladas de materia fresca por año, un poco más de tres toneladas de materia seca, de la cual el 34% correspondió a follaje. En los ciclos de poda semestral y trimestral, la biomasa originada no alcanzó a superar la tonelada y media de materia seca por hectárea.año⁻¹, no obstante, el 50% correspondió a las hojas.

Tabla 9.21. Aporte de biomasa seca (t.ha⁻¹.año⁻¹) y reciclaje de nutrientes (kg.ha⁻¹.año⁻¹), en café y cuatro especies arbóreas empleadas como sombrío (Urrego y Farfán, 2000).

Especies	Biomasa seca (t.ha ⁻¹ .año ⁻¹)	Nutrientes (kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹)				
		N	P	K	Ca	Mg
Café	4,8	102,7	4,4	62,2	79,7	16,1
<i>Cordia alliodora</i>	4,0	68,0	3,7	39,3	184,5	33,3
<i>Pinus oocarpa</i>	3,3	18,9	1,0	10,5	18,8	2,6
<i>Eucalyptus grandis</i>	6,4	45,8	2,9	35,8	84,9	9,2
<i>Inga edulis</i>	10,6	203,6	8,2	32,8	150,8	9,8

Tabla 9.22. Producción acumulada (1999 a 2002) de café cereza (kg/planta), según niveles de fertilización y ciclos de poda (días) (Cenicafé, 2002(a)).

Período de las podas (días)	Nivel de fertilización (%)					
	0		50		100	
	Producción	c.v.	Producción	c.v.	Producción	c.v.
90	8,98	32,51	12,28	29,53	15,49	27,08
180	10,56	35,19	11,37	19,36	13,92	13,67
360	10,77	22,80	8,65	16,33	12,19	16,46

c.v. = Coeficiente de variación

Tabla 9.23. Aporte de biomasa por árbol, en cada ciclo de poda de *E. fusca* por año (Cenicafé, 2002(a)).

	Períodos de podas (días)					
	90		180		360	
	kg	c.v.	kg	c.v.	kg	c.v.
Total	14,69	76,33	33,02	72,76	71,02	76,83

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

- El término orgánico algunas veces se usa para significar que los alimentos producidos utilizando fuentes orgánicas de nutrimentos poseen características especiales, beneficios especiales para la salud y quizás, mayor valor nutricional. En relación al uso de nutrimentos, se refiere a la práctica de fertilizar la planta solamente con residuos de cultivos o desechos animales en lugar de las fuentes químicas lo que implica que unos son naturales y los otros sintéticos.
- Antes de aplicar un abono orgánico deben considerarse sus características: (1) Composición mineral; (2) Humedad, menor del 15%; (3) Contenido de ácidos fúlvicos; (4) Relación C:N; (5) pH; (6) Conductividad eléctrica; (7) C.I.C.; (8) Cantidad de materiales inertes; (9) Cantidad de partículas que componen el material; (10) Contenido de metabolitos potencialmente tóxicos y (11) Contenido de patógenos, tanto de plantas como de animales.
- En la Estación Central Naranjal de Cenicafé, se evaluó la transferencia de nutrimentos y tasa de descomposición de residuos vegetales producidos por *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* y *Tephrosia candida* establecidas a 172.000, 86.000 y 60.000 plantas.ha⁻¹, Jiménez (2004). La producción media de biomasa seca de *Cajanus cajan* fue de 7,6 t.ha⁻¹, de *Crotalaria juncea* de 4,2 t.ha⁻¹ y de *Tephrosia candida* de 5,4 t.ha⁻¹. La tasa relativa de descomposición mensual (k) en *C. cajan* fluctuó entre 0,18 y 0,21, en *C. juncea* entre 0,25 y 0,32 y en *T. candida* entre 0,18 y 0,21; La densidad de siembra no afectó la tasa de descomposición de los residuos vegetales de *C. cajan* y *T. candida*. Los residuos vegetales de *C. cajan* se descomponen más lentamente ($K = 0,20$) que los residuos de *C. juncea* y *T. candida* ($K = 0,29$ y $0,26$ respectivamente). La fracción de la materia orgánica no descompuesta (K_d) en un período de 180 días fluctuó entre 28 y 34% en *C. cajan*, entre el 11 y 22% en *C. juncea* y entre el 19 y 22% en *T. candida*. En un período de 180 días se descompone e incorpora al suelo el 71,2% de los residuos producidos por *C. cajan*, el 85,0% de los producidos por *C. juncea* y el 80,6% de los producidos por *T. candida*. Las tasas máximas de descomposición se presentan en los 30 primeros días, 23,1%, 40,2% y 28,8% en *C. cajan*, *C. juncea* y *T. candida* respectivamente. Las tasa más bajas de descomposición se registraron entre los 120 y 180 días, 7,7%, 6,5% y 7,6% en *C. cajan*, *C. juncea* y *T. candida* respectivamente. En un período de 180 días de descomposición la biomasa seca producida por *C. cajan* transfiere al suelo el 57,8% del N, 79,8% del P, el 96,8% del K, el 25% del Ca y el 65,7% del Mg contenido en los residuos vegetales. En este mismo período, la descomposición de los residuos vegetales producidos por *C. juncea*, transfiere al suelo el 84,6% del N, 89,1% del P, 98,8 del K, el 74,3% del Ca y el 90,0% del Mg contenido en estos residuos. Transcurridos 180 días los residuos vegetales producidos por *T. Candida*, transfirieron al suelo el 78.3% del N, el 84.2% del P, el 97,9 % del K, el 50,9% del Ca y el 86,9% del Mg contenidos en los residuos. La velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo, independiente de la forma en que se encuentre, está condicionada por numerosos factores, entre ellos: Origen y naturaleza de la materia orgánica, agentes responsables de la descomposición, humedad, temperatura, acidez del suelo y contenido de nutrimentos del suelo.
- Se hacen innecesarias las aplicaciones de fungicidas, la aplicación de fertilizantes vía edáfica o foliar y se obtienen plantas con el desarrollo y vigor adecuados para ser trasplantadas al campo entre cuatro y seis meses de edad en el almácigo.
- Los resultados de la producción media de cuatro cosechas en la Subestación Experimental Paraguaicito y de cinco cosechas en la Subestación La Catalina, indican que con la aplicación de 2 a 3 kg de lombricompuesto por planta por año, se obtienen producciones similares que cuando se aplica al café fertilizantes químicos basados en los análisis de suelos. En la Estación Central Naranjal, la producción es mayor cuando se aplican de 2,0 a 3,0 kg de lombricompuesto por planta por año que cuando se hace fertilización química.
- En la Subestación Experimental La Catalina se determinó la producción de materia orgánica y el ciclaje de nutrimentos producida por la asociación de plátano con el café, con y sin aplicación de fertilizante. El café se estableció a densidades de 2.500 plantas/ha y el plátano a 278 plantas/ha. La biomasa seca de plátano acumulada durante cuatro ciclos productivos, en el café sin aplicación de fertilizante fue de 7,7 t.ha⁻¹ y en el café con aplicación de fertilizante de 5,7 t.ha⁻¹. La transferencia de nutrimentos por la materia seca producida por el plátano en los cuatro ciclos productivos, al café sin aplicación de fertilizante fue de 84,7 kg de N.ha⁻¹, 8,4 kg de P.ha⁻¹, 323,4 kg de K.ha⁻¹, 68,2 kg de Ca.ha⁻¹ y de 8,9 kg de Mg.ha⁻¹. En el café con aplicación de fertilizante, el plátano transfirió 83,7 kg de N.ha⁻¹, 6,5 kg de P.ha⁻¹, 238,1 kg de K.ha⁻¹, 55,4 kg de Ca.ha⁻¹ y 7,3 kg de Mg.ha⁻¹
- Efecto de la poda de *Erythrina fusca* como sombrío del café a diferentes niveles de fertilización. La biomasa cuantificada por hectárea en tratamientos de poda de ciclo anual fue de 11,8 toneladas de materia fresca por año, un poco más de tres toneladas de materia seca, de la cual el 34% correspondió a follaje. En los ciclos de poda semestral y trimestral, la biomasa originada no alcanzó a superar la tonelada y media de materia seca por hectárea/año; no obstante, el 50% correspondió a las hojas.

Tabla 9.24. Abonos, fertilizantes y acondicionadores de suelos permitidos en la producción orgánica (USA, 2000; JAS, 2001; MINAGRICULTURA, 2006; FAO, 1999; U.E., 2005).

Insumo orgánico	Res. No. 0187 (Colombia)		U.E 2092/91 (Unión Euro.)		USDA-NOP (EE.UU)		CODEX ALIMENT.		JAS (Japón)	
	L.A	A.P	L.A	A.P	L.A	A.P	L.A	A.P	L.A	A.P
	Abono tipo "Bocashi"									
Abonos foliares de origen natural										
Aglomerados de pelos y piel, productos lácteos										
Algas Marinas y sus derivados										
Arcillas (bentonita, perlita, vermiculita, entre otras)										
Aserrín, cortezas vegetales y residuos de madera										
Azufre natural										
Boro soluble										
Cachaza, vinaza										
Cal apagada										
Cal dolomita (Cal agrícola)										
Caldo Super Cuatro										
Caldos microbiológicos (Microbiano de Rhizósfera).										
Caliza, (cales agrícolas)										
Carbón vegetal										
Carbonato de calcio de origen natural										
Carbonato de magnesio										
Carbonato de magnesio de origen natural										
Cenizas de madera										
Ceolitas (caolín, silicato de aluminio)										
Cloruro de calcio										
Cloruro de potasio (rocas potásicas)										
Cloruro de sodio										
Conchas marinas trituradas										
Desechos domésticos orgánicos compostados										
Escoria de alto horno (Calfos)										
Estiércol líquido u orina										
Estiércoles compostados de animales										
Fosfato aluminocálcico										
Fofato de magnesio										
Fuentes naturales de microelementos										
Guano										
Harina de carne, harina de pluma, lana, pelos, pescado										
Harina de sangre, polvo de pezuña, polvo de cuerno										
Hidróxido de magnesio										
Leonarditas										

Continúa...

